职业教育课程改革规划新教材

电工电子技术与技能（通用）
（第2版）

范国伟　主　编

周　昊　任小平　副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

内 容 简 介

本书参照教育部新颁布的《电工电子技术与技能教学大纲》，结合近几年职业教育发展情况，为了有利于加强技术与技能实训的教学而编写。主要内容包括：直流电路，磁与电磁，电容与电感，单相正弦交流电路，三相正弦交流电路，用电技术，常用电器，三相异步电动机的基本控制，常用半导体器件，整流、滤波及稳压电路，放大电路和集成运算放大器，数字电子技术基础，组合逻辑电路和时序逻辑电路，数字电路的典型应用等。本书参考有关的职业资格标准或行业技能鉴定标准，突出知识的应用，体现“必需、够用”的原则，增加培养学生实践能力的内容。同时配套有电子教学参考资料包（包括教学指南，电子教案及习题答案）。

本书可作为职业院校电工电子通用教材，也可作为有关职业培训和岗位培训的教材。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电工电子技术与技能：通用 / 范国伟主编. —2 版. —北京：电子工业出版社，2016.11

ISBN 978-7-121-29753-3

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①范… Ⅲ. ①电工技术—职业教育—教材②电子技术—职业教育—教材 Ⅳ. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 201047 号

策划编辑：蒲 玥
责任编辑：蒲 玥
印 刷：
装 订：
出版发行：电子工业出版社
北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036
开 本：787×1 092 1/16 印张：18.5 字数：473.6 千字
版 次：2010 年 6 月第 1 版
2016 年 11 月第 2 版
印 次：2016 年 11 月第 1 次印刷
定 价：42.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254485，puyue@phei.com.cn。

前　　言

本书是根据教育部新颁布的职业院校《电工电子技术与技能教学大纲》的主要精神，并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级标准编写的职业教育规划教材。本书总体分为四个部分来学习：电路基础、电工技术、模拟电子技术和数字电子技术。学生通过本书的理论学习和技能实训练习，掌握简单交、直流电路的基本工作原理和分析方法，熟悉模拟电路和数字电路的构成、区别和不同的分析方法；通过技能训练，提高学生的电工与电子电路实际操作的综合能力，使学生具备电工电子专业高素质劳动者和中初级专门人才所必需的电工电子技术的基本知识及基本技能，为学生学习专业知识和职业技能，提高全面素质，增强适应岗位变化的能力和继续学习的能力打下一定的基础。

电工与电子技术是一门理论和实践紧密结合的课程。本书在编写过程中从职业教育培养应用型技术人才这一目标出发，以电工电子技术课程教学基本要求为依据，以应用为目的，以必需、够用为度，尽量降低专业理论的比重，以突出实际应用，培养技能为教学重点，由浅入深、循序渐进地介绍了有关电工电子以及应用方面的基础知识，着眼于学生在应用能力方面的培养，突出重点、分散难点，力求使读者一看就懂、一学就会。本书每章前都配有学习目标，每章后面也都安排了小结和相应的适量习题。同时，在本书中增加了 20 个技能训练，突出课程的应用性、实践性、针对性和有效性。

本书可作为职业院校电工电子通用教材，也可作为有关职业培训和岗位培训的教材。总教学时数为 120 学时（包括技能训练 30 学时），其中带“＊”号的表示选修课程。各部分内容的学时分配建议如下。

<table>
<tr><th>模　　块</th><th colspan="2">教 学 单 元</th><th colspan="2">建议学时数</th></tr>
<tr><td rowspan="14">基础模块</td><td rowspan="5">电路基础</td><td>第 1 章　实训室认识与安全用电</td><td>2</td><td rowspan="14">54</td></tr>
<tr><td>第 2 章　直流电路</td><td>8</td></tr>
<tr><td>第 4 章　电容与电感</td><td>2</td></tr>
<tr><td>第 5 章　单相正弦交流电路</td><td>8</td></tr>
<tr><td>第 6 章　三相正弦交流电路</td><td>2</td></tr>
<tr><td rowspan="3">电工技术</td><td>第 7 章　用电技术</td><td>1</td></tr>
<tr><td>第 8 章　常用电器</td><td>6</td></tr>
<tr><td>第 9 章　三相异步电动机的基本控制</td><td>2</td></tr>
<tr><td rowspan="4">模拟电子技术</td><td>第 10 章　认识电子实训室和基本技能训练</td><td>2</td></tr>
<tr><td>第 11 章　常用半导体器件</td><td>4</td></tr>
<tr><td>第 12 章　整流、滤波及稳压电路</td><td>4</td></tr>
<tr><td>第 13 章　放大电路和集成运算放大器</td><td>4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">数字电子技术</td><td>第 14 章　数字电子技术基础</td><td>2</td></tr>
<tr><td>第 15 章　组合逻辑电路和时序逻辑电路</td><td>7</td></tr>
</table>

续表

模　　块	教 学 单 元		建议学时数	
选学模块	电路基础	1.4.3　电流对人体的伤害 2.5.4　负载的额定值	2	36
		第 3 章　磁与电磁	4	
		4.1.3　电容器的串联和并联	2	
		5.7　RLC 串联电路	2	
		6.3　三相负载功率的计算	2	
	电工技术	8.2.4　常用变压器简介 8.3.5　三相绕线式异步电动机 8.3.6　单相交流异步电动机 8.4　直流电动机	4	
		9.1　电气控制原理图的有关知识 9.3.2　接触器、按钮双重连锁的正、反转控制线路 9.4　几种工作机械的电气控制线路简介 9.5　现代控制技术的简介	6	
	模拟电子技术	11.4.6　晶闸管	1	
		12.3　稳压电路	1	
		13.1.5　共发射极基本放大电路的交流性能分析 13.2.3　多级放大电路的电压放大倍数 13.3.2　射极输出器	6	
	数字电子技术	15.3.2　D 触发器 15.3.3　JK 触发器	2	
		第 16 章　数字电路的典型应用	4	

（注：第 3、16 章选修内容可扫描二维码阅读或根据提示向出版社索取。）

本书由安徽工业大学范国伟任主编，安徽马鞍山工业学校周昊、安徽省当涂县职业教育中心任小平任副主编。广东省农工商职业技术学校莫南钊，安徽省马鞍山技师学院袁洪刚、关越、杨兰平、聂小新，安徽工业大学桑建明、刘一帆，中冶华天马鞍山钢铁设计院朱丹，安徽星马汽车华菱股份公司郭明等老师也参加了本书的编写。全书由范国伟统稿，他做了很多重要的修改与补充。在本书编写的过程中，得到安徽工业大学、安徽省当涂县职业教育中心、广东省农工商职业技术学校、安徽马鞍山技师学院和安徽省马鞍山工业学校的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，加上时间仓促，书中疏漏之处在所难免，恳请使用本书的教师和同学批评指正。

为方便教师教学，本书还配有电子教学参考资料包，请有此需要的教师登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）免费注册后再进行下载，同时，可通过扫描每章后面的二维码查阅每章的辅助教学微视频。有问题时请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系（E-mail：hxedu@phei.com.cn）。

编　者

目　　录

第 1 章　实训室认识与安全用电 ······ 1
1.1　电工电子技术基础技能的重要性 ······ 1
1.2　电工实训室简介 ······ 1
1.2.1　电工实训室的电源配置 ······ 2
1.2.2　常用电工工具 ······ 2
1.2.3　常用电工仪器仪表 ······ 2
1.2.4　电工实训室操作规程及要求 ······ 2
1.3　电气火灾的防范及扑救常识 ······ 3
1.3.1　电气火灾的一般原因 ······ 3
1.3.2　电气火灾的防范及扑救常识 ······ 3
1.4　安全用电常识 ······ 3
1.4.1　触电事故的一般原因 ······ 3
1.4.2　常见的触电方式 ······ 4
1.4.3　电流对人体的伤害* ······ 4
1.4.4　防止触电的保护措施 ······ 5
1.4.5　触电急救 ······ 6
1.5　技能训练 1　认识电工实训室 ······ 7
1.5.1　技能训练目标 ······ 7
1.5.2　技能训练仪器与器件 ······ 7
1.5.3　技能训练内容 ······ 8
1.5.4　注意事项 ······ 9
1.5.5　思考问题 ······ 9
1.5.6　实训要求 ······ 9
1.6　技能训练 2　触电急救的方法 ······ 10
1.6.1　技能训练目标 ······ 10
1.6.2　技能训练仪器和器件 ······ 10
1.6.3　技能训练内容 ······ 10
1.6.4　注意事项 ······ 12
1.6.5　思考问题 ······ 13
1.6.6　实训要求 ······ 13
思考题 1 ······ 13
教学微视频 ······ 13

第 2 章　直流电路 ······ 14

2.1　电路的组成、作用及状态 ······ 14

2.1.1 电路和电路图 ········ 14
2.1.2 电路的作用 ········ 15
2.1.3 电路的工作状态 ········ 15
2.2 电路中的基本物理量 ········ 16
2.2.1 电流 ········ 16
2.2.2 电压 ········ 17
2.2.3 电位 ········ 17
2.2.4 电动势 ········ 18
2.2.5 电阻与电导 ········ 18
2.3 欧姆定律及其应用 ········ 21
2.3.1 一段无源支路的欧姆定律 ········ 21
2.3.2 全电路欧姆定律 ········ 21
2.4 电阻的串、并联及其应用 ········ 22
2.4.1 电阻串联电路 ········ 22
2.4.2 电阻并联电路 ········ 24
2.4.3 电阻混联电路 ········ 25
2.5 电能与电功率 ········ 26
2.5.1 电能 ········ 26
2.5.2 电功率 ········ 27
2.5.3 焦耳定律 ········ 27
2.5.4 负载的额定值* ········ 28
2.6 基尔霍夫电流定律和电压定律 ········ 28
2.6.1 概述 ········ 28
2.6.2 基尔霍夫电流定律（KCL） ········ 29
2.6.3 基尔霍夫电压定律（KVL） ········ 30
2.7 技能训练 3 直流电流表与直流电压表的正确使用 ········ 31
2.7.1 技能训练目标 ········ 31
2.7.2 技能训练仪器与器件 ········ 31
2.7.3 技能训练内容与步骤 ········ 31
2.7.4 注意事项 ········ 33
2.7.5 创新能力的启发和培养 ········ 33
2.7.6 思考问题 ········ 33
2.7.7 实训要求 ········ 33
2.8 技能训练 4 指针式万用表的正确使用 ········ 33
2.8.1 技能训练目标 ········ 33
2.8.2 技能训练仪器与器件 ········ 33
2.8.3 技能训练内容与步骤 ········ 34
2.8.4 注意事项 ········ 36
2.8.5 创新能力的启发和培养 ········ 36
2.8.6 思考问题 ········ 36

2.8.7　实训要求……37
思考题 2……37
教学微视频……37

第 3 章　磁与电磁*……38

3.1　电流的磁场……38
3.1.1　磁的基本知识……38
3.1.2　电流的磁场……38
3.2　磁场中的有关物理量……38
3.2.1　磁感应强度……38
3.2.2　磁通……38
3.2.3　磁导率……38
3.2.4　磁场强度……38
3.3　磁化与磁性材料……38
3.3.1　铁磁材料的磁化……38
3.3.2　磁滞回线……38
3.3.3　铁磁材料的性能、分类和用途……38
3.4　磁路欧姆定律及电磁铁……38
3.4.1　磁路欧姆定律……38
3.4.2　电磁铁……38
3.5　电磁感应定律……38
3.5.1　电磁感应现象……38
3.5.2　楞次定律……38
3.5.3　法拉第电磁感应定律……38
3.5.4　自感与自感系数……38
思考题 3……38
教学微视频……38

第 4 章　电容与电感……39

4.1　电容器……39
4.1.1　电容器与电容量……39
4.1.2　电容器的种类和额定值……40
4.1.3　电容器的串联和并联*……42
4.2　电感……43
4.2.1　电感线圈与电感元器件……43
4.2.2　电感线圈的用途和选用……43
4.3　技能训练 5　电阻、电感和电容的识别与检测……44
4.3.1　技能训练目标……44
4.3.2　技能训练仪器与器件……44
4.3.3　技能训练内容与步骤……45

4.3.4 注意事项 ······ 49
4.3.5 创新能力的启发和培养 ······ 49
4.3.6 思考问题 ······ 49
4.3.7 实训要求 ······ 49
思考题 4 ······ 50
教学微视频 ······ 50

第 5 章 单相正弦交流电路 ······ 51

5.1 正弦交流电路的基本概念 ······ 51
5.1.1 正弦交流电动势的产生 ······ 51
5.1.2 正弦交流电的三要素 ······ 52
5.2 正弦交流电的表示方法 ······ 55
5.2.1 解析法 ······ 55
5.2.2 波形图法 ······ 55
5.2.3 旋转矢量法 ······ 55
5.3 纯电阻电路 ······ 57
5.3.1 电流与电压的相位关系 ······ 57
5.3.2 电流与电压的数量关系 ······ 57
5.3.3 功率 ······ 57
5.4 纯电感电路 ······ 58
5.4.1 电流与电压的相位关系 ······ 59
5.4.2 电流与电压的数量关系 ······ 59
5.4.3 功率 ······ 59
5.5 纯电容电路 ······ 61
5.5.1 电流与电压的相位关系 ······ 61
5.5.2 电流与电压的数量关系 ······ 61
5.5.3 功率 ······ 62
5.6 RL 串联电路 ······ 63
5.6.1 电流与电压的相位关系 ······ 63
5.6.2 电流与电压的数量关系 ······ 64
5.6.3 功率与功率因数 ······ 65
5.7 RLC 串联电路* ······ 67
5.7.1 串联电路 ······ 67
5.7.2 串联谐振 ······ 69
5.8 技能训练 6 交流电流表、交流电压表及电能表的使用 ······ 70
5.8.1 技能训练目标 ······ 70
5.8.2 技能训练仪器与器件 ······ 71
5.8.3 技能训练内容与步骤 ······ 71
5.8.4 注意事项 ······ 73
5.8.5 创新能力的启发和培养 ······ 73

5.8.6 思考问题 ······73
5.8.7 实训要求 ······73
思考题 5 ······73
教学微视频 ······73

第 6 章 三相正弦交流电路 ······74

6.1 三相交流电源 ······74
6.1.1 三相对称电动势的产生 ······74
6.1.2 三相对称电动势的表示法 ······75
6.1.3 相序 ······75
6.1.4 三相交流电源的连接 ······76
6.2 三相负载的连接 ······78
6.2.1 三相负载的星形连接 ······78
6.2.2 三相对称负载的三角形连接 ······80
6.3 三相负载功率的计算* ······81
6.4 技能训练 7 三相电路的测量 ······83
6.4.1 技能训练目标 ······83
6.4.2 技能训练仪器和器件 ······83
6.4.3 技能训练内容和步骤 ······83
6.4.4 注意事项 ······85
6.4.5 创新能力的启发和培养 ······85
6.4.6 思考问题 ······85
6.4.7 实训要求 ······85
思考题 6 ······85
教学微视频 ······85

第 7 章 用电技术 ······86

7.1 电力供电与节约用电 ······86
7.1.1 电力系统概述 ······86
7.1.2 计划用电与节约用电 ······87
7.2 用电保护 ······88
7.2.1 保护接地 ······88
7.2.2 保护接零 ······88
7.2.3 漏电保护器 ······89
7.3 技能训练 8 漏电保护器的安装 ······89
7.3.1 技能训练目标 ······89
7.3.2 技能训练仪器与器件 ······89
7.3.3 技能训练内容与步骤 ······91
7.3.4 注意事项 ······92
7.3.5 创新能力的启发和培养 ······92

7.3.6 思考问题……92
7.3.7 实训要求……92
思考题 7……93
教学微视频……93

第 8 章 常用电器……94

8.1 常用照明灯具……94
8.1.1 照明的概念……94
8.1.2 白炽灯照明电路……96
8.1.3 日光灯照明电路……97
8.1.4 节能新型电光源及其应用……98
8.2 变压器……99
8.2.1 变压器的结构、分类与额定值……99
8.2.2 变压器工作原理……100
8.2.3 变压器的功率和效率……103
8.2.4 常用变压器简介*……103
8.3 交流电动机……107
8.3.1 三相笼型交流异步电动机的基本结构……107
8.3.2 三相笼型交流异步电动机的工作原理……108
8.3.3 三相笼型交流异步电动机的转差率与机械特性……112
8.3.4 三相笼型交流异步电动机的铭牌……114
8.3.5 三相绕线式异步电动机*……115
8.3.6 单相交流异步电动机*……116
8.4 直流电动机*……118
8.4.1 直流电动机的基本结构……118
8.4.2 直流电动机的工作原理……119
8.4.3 直流电动机的使用方法……121
8.5 常用低压电器……121
8.5.1 电器的基本知识……121
8.5.2 低压开关……122
8.5.3 熔断器……123
8.5.4 交流接触器……125
8.5.5 继电器……127
8.5.6 主令电器……129
8.6 技能训练 9 白炽灯与日光灯等照明电路的安装……131
8.6.1 技能训练目标……131
8.6.2 技能训练仪器与器件……131
8.6.3 技能训练内容与步骤……131
8.6.4 注意事项……132
8.6.5 创新能力的启发和培养……133

8.6.6 思考问题 ……133
8.6.7 实训要求 ……133
8.7 技能训练 10　三相异步电动机绝缘电阻的测量及绕组首尾端的判断 ……133
8.7.1 技能训练目标 ……133
8.7.2 技能训练仪器和器件 ……133
8.7.3 技能训练内容与步骤 ……133
8.7.4 注意事项 ……135
8.7.5 创新能力的启发和培养 ……135
8.7.6 思考问题 ……135
8.7.7 实训要求 ……135
思考题 8 ……135
教学微视频 ……137
第 9 章　三相异步电动机的基本控制 ……138
9.1 电气控制原理图的有关知识* ……138
9.1.1 电气控制线路的组成 ……138
9.1.2 电气原理图的绘制规则 ……140
9.2 三相笼型异步电动机的正转控制线路 ……142
9.2.1 点动正转控制线路 ……142
9.2.2 接触器自锁正转控制线路 ……143
9.2.3 具有过载保护的自锁正转控制线路 ……144
9.2.4 连续与点动混合控制的正转控制线路 ……144
9.3 三相笼型异步电动机的正反转控制线路 ……145
9.3.1 接触器连锁的正、反转控制线路 ……145
9.3.2 接触器、按钮双重连锁的正、反转控制线路* ……146
9.4 几种工作机械的电气控制线路简介* ……147
9.4.1 识读电气控制线路原理图的方法 ……147
9.4.2 CA6140 卧式车床电气控制线路 ……147
9.4.3 电动葫芦的电气控制线路 ……150
9.5 现代控制技术的简介* ……152
9.5.1 可编程控制器及其应用基础 ……152
9.5.2 变频器及其应用基础 ……163
9.5.3 传感器及其应用基础 ……166
9.6 技能训练 11　三相异步电动机点动与连续运行控制线路的安装 ……169
9.6.1 技能训练目标 ……169
9.6.2 技能训练仪器和器件 ……169
9.6.3 技能训练内容与步骤 ……169
9.6.4 注意事项 ……170
9.6.5 创新能力的启发和培养 ……170
9.6.6 思考问题 ……170

9.6.7 实训要求 ······170
9.7 技能训练 12 三相异步电动机接触器连锁正反转控制线路的安装 ······171
9.7.1 技能训练目标 ······171
9.7.2 技能训练仪器和器件 ······171
9.7.3 技能训练内容与步骤 ······171
9.7.4 注意事项 ······172
9.7.5 创新能力的启发和培养 ······172
9.7.6 思考问题 ······173
9.7.7 实训要求 ······173
思考题 9 ······173
教学微视频 ······173

第 10 章 认识电子实训室和基本技能训练 ······174

10.1 电子实训室简介 ······174
10.1.1 电子实训室的规章制度 ······174
10.1.2 电子实训室的操作规程 ······175
10.1.3 电子实训室安全用电规则 ······175
10.1.4 电子实训室的电源配置与仪器设备配套标准 ······176
10.2 基本技能训练 ······176
10.2.1 常用电子仪器仪表的基本使用方法 ······177
10.2.2 焊接工具和材料的使用 ······183
10.3 技能训练 13 电路焊接的基本技术 ······186
10.3.1 技能训练目标 ······186
10.3.2 技能训练仪器和器件 ······186
10.3.3 技能训练内容与步骤 ······186
10.3.4 注意事项 ······188
10.3.5 创新能力的启发和培养 ······189
10.3.6 思考问题 ······189
10.3.7 实训要求 ······189
思考题 10 ······189
教学微视频 ······189

第 11 章 常用半导体器件 ······190

11.1 半导体基础知识 ······190
11.1.1 半导体的导电方式 ······190
11.1.2 N 型半导体和 P 型半导体 ······191
11.1.3 PN 结及其单向导电性 ······191
11.2 半导体二极管 ······192
11.2.1 二极管的结构、符号和类型 ······192
11.2.2 二极管的伏安特性曲线 ······192

11.2.3　二极管的主要参数 ……193
11.2.4　二极管的识别和简易检测方法 ……194
11.3　半导体三极管 ……194
11.3.1　三极管的结构、符号和类型 ……194
11.3.2　三极管的电流放大作用 ……195
11.3.3　三极管的伏安特性曲线 ……196
11.3.4　三极管的主要参数 ……198
11.3.5　三极管的识别和简易检测方法 ……199
11.4　其他半导体器件 ……200
11.4.1　稳压二极管 ……200
11.4.2　发光二极管 ……200
11.4.3　光电二极管 ……201
11.4.4　变容二极管 ……201
11.4.5　开关二极管 ……201
11.4.6　晶闸管* ……202
11.5　技能训练 14　二极管、三极管和晶闸管的识别与检测 ……203
11.5.1　技能训练目标 ……203
11.5.2　技能训练仪器与器件 ……203
11.5.3　技能训练内容与步骤 ……203
11.5.4　注意事项 ……206
11.5.5　创新能力的启发和培养 ……206
11.5.6　思考问题 ……206
11.5.7　实训要求 ……206
思考题 11 ……206
教学微视频 ……207

第 12 章　整流、滤波及稳压电路 ……208

12.1　整流电路 ……209
12.1.1　单相半波整流电路 ……209
12.1.2　单相桥式整流电路 ……211
12.2　滤波电路 ……213
12.2.1　电容滤波电路 ……213
12.2.2　电感滤波电路 ……216
12.2.3　复式滤波电路 ……216
12.3　稳压电路* ……217
12.3.1　简单的稳压电路 ……217
12.3.2　集成稳压器 ……220
12.4　技能训练 15　家用调光台灯的安装 ……222
12.4.1　技能训练目标 ……222
12.4.2　技能训练仪器和器件 ……222

12.4.3 技能训练内容与步骤 ······ 222
12.4.4 注意事项 ······ 223
12.4.5 创新能力的启发和培养 ······ 223
12.4.6 思考问题 ······ 224
12.4.7 实训要求 ······ 224
思考题 12 ······ 224
教学微视频 ······ 224

第 13 章 放大电路和集成运算放大器 ······ 225

13.1 共发射极基本放大电路 ······ 225
13.1.1 共发射极基本放大电路的组成 ······ 226
13.1.2 共发射极基本放大电路的工作原理 ······ 226
13.1.3 共发射极基本放大电路的组成原则 ······ 228
13.1.4 静态工作点的设置和稳定 ······ 229
13.1.5 共发射极基本放大电路的交流性能分析* ······ 230
13.2 多级放大电路 ······ 231
13.2.1 多级放大电路的组成 ······ 232
13.2.2 多级放大电路的耦合方式 ······ 232
13.2.3 多级放大电路的电压放大倍数* ······ 233
13.3 负反馈放大器 ······ 234
13.3.1 负反馈的基本概念 ······ 234
13.3.2 射极输出器* ······ 235
13.3.3 负反馈对放大电路的影响 ······ 236
13.4 集成运算放大器及应用 ······ 237
13.4.1 集成运算放大器的结构与符号 ······ 237
13.4.2 集成运算放大器的引脚功能 ······ 239
13.4.3 基本集成运算放大器 ······ 239
13.5 技能训练 16 共发射极基本放大电路的安装与调试 ······ 243
13.5.1 技能训练目标 ······ 243
13.5.2 技能训练仪器与器件 ······ 243
13.5.3 技能训练内容与步骤 ······ 243
13.5.4 注意事项 ······ 244
13.5.5 创新能力的启发和培养 ······ 245
13.5.6 思考问题 ······ 245
13.5.7 实训要求 ······ 245
思考题 13 ······ 245
教学微视频 ······ 245

第 14 章 数字电子技术基础 ······ 246

14.1 概述 ······ 246

14.1.1　数字信号和数字电路 ……246
14.1.2　数字电路的特点 ……246
14.1.3　数的表示方法 ……247
14.2　逻辑门电路 ……248
14.2.1　与逻辑和与门电路 ……248
14.2.2　或逻辑和或门电路 ……248
14.2.3　非逻辑和非门电路 ……249
14.2.4　复合逻辑门 ……250
14.3　集成门电路 ……251
14.3.1　TTL 集成与非门电路 ……251
14.3.2　CMOS 集成门电路 ……253
14.4　技能训练 17　门电路逻辑功能及测试 ……254
14.4.1　技能训练目标 ……254
14.4.2　技能训练仪器与器件 ……254
14.4.3　技能训练内容 ……254
14.4.4　注意事项 ……256
14.4.5　创新能力的启发和培养 ……256
14.4.6　思考问题 ……256
14.4.7　实训要求 ……256
14.5　技能训练 18　集成逻辑电路的测试 ……256
14.5.1　技能训练目标 ……256
14.5.2　技能训练仪器与器件 ……256
14.5.3　技能训练内容与步骤 ……257
14.5.4　注意事项 ……257
14.5.5　创新能力的启发和培养 ……258
14.5.6　思考问题 ……258
14.5.7　实训要求 ……258
思考题 14 ……258
教学微视频 ……258

第 15 章　组合逻辑电路和时序逻辑电路 ……259

15.1　组合逻辑电路 ……259
15.1.1　常见的组合逻辑电路 ……259
15.1.2　组合逻辑电路的读图方法和步骤 ……260
15.2　编码器与译码器 ……261
15.2.1　编码器 ……261
15.2.2　译码器 ……262
15.3　触发器 ……264
15.3.1　RS 触发器 ……264
15.3.2　D 触发器* ……265

15.3.3 JK 触发器* ······ 266
15.4 寄存器 ······ 268
15.4.1 数码寄存器 ······ 268
15.4.2 移位寄存器 ······ 268
15.5 计数器 ······ 271
15.5.1 二进制计数器 ······ 271
15.5.2 十进制计数器 ······ 275
15.6 技能训练 19 触发器及其应用 ······ 277
15.6.1 技能训练目标 ······ 277
15.6.2 技能训练仪器与器件 ······ 277
15.6.3 技能训练内容与步骤 ······ 277
15.6.4 注意事项 ······ 279
15.6.5 创新能力的启发和培养 ······ 279
15.6.6 思考问题 ······ 279
15.6.7 实训要求 ······ 279
思考题 15 ······ 279
教学微视频 ······ 279

第 16 章 数字电路的典型应用* ······ 280

16.1 脉冲信号的产生与整形电路 ······ 280
16.1.1 单稳态触发 ······ 280
16.1.2 多谐振荡器——无稳态触发器 ······ 280
16.1.3 集成 555 定时器及应用 ······ 280
16.2 模/数和数/模转换器 ······ 280
16.2.1 数/模转换器 ······ 280
16.2.2 模/数转换器 ······ 280
16.3 技能训练 20 集成 555 定时器的应用 ······ 280
16.3.1 技能训练目标 ······ 280
16.3.2 技能训练仪器与器件 ······ 280
16.3.3 技能训练内容与步骤 ······ 280
16.3.4 注意事项 ······ 280
16.3.5 创新能力的启发和培养 ······ 280
16.3.6 思考问题 ······ 280
16.3.7 实训要求 ······ 280
思考题 16 ······ 280
教学微视频 ······ 280

第 1 章　实训室认识与安全用电

【本章学习目标】

1. 了解电与电工电子产品在实际生产、生活中的广泛应用。
2. 了解电工实训室的电源配置、常用电工电子仪器仪表和工具的类型及应用。
3. 掌握实训室操作规程及安全用电的规定。
4. 了解人体触电的类型及常见原因，掌握防止触电的保护措施。
5. 掌握电气火灾的防范及扑救常识。

【教学目标】

1. 知识目标：了解电工实训室，掌握电气火灾的处理方法，以及触电现场的紧急处理措施。

2. 能力目标：通过现场观察与讲解，初步形成对电工电子课程的感性认识，培养学习兴趣。

【教学重点】

实训室操作规程及安全用电的规定。

【教学难点】

触电急救方法。

【教学方法】

参观法、实验法、演示法、讨论法。

1.1　电工电子技术基础技能的重要性

随着科学技术的不断发展和创新，电工电子基础知识已经渗透到众多专业与领域，也已成为一项学生必须掌握的知识技能。所以，实验课是本专业教学的重要环节，科学地进行实验过程是工程技术人员必备的技术素质。为突破传统的学科教育对学生技能培养的局限性，本书从提高学生的全面素质出发，着重技术的传授和动手能力的培养，突出电工电子技能操作，培养学生在实践中分析问题和解决问题的能力。

1.2　电工实训室简介

电工实训室既可用于学生短期实验也可作为长期训练的场所，故应配备足够的实验、实训与考核设备。同时，其面积、安全装置要符合安全规定，实训室还应备有实训室规则、日常制度和注意事项等。

1.2.1 电工实训室的电源配置

根据教学实验课题的需要，实训室的电源应满足教学实验与安全要求。首先实验设备所用的电源应有最基础的多种安全保护，例如，短路保护、过载保护、欠压保护、漏电保护和接地保护等。

交流电源的输入容量大于实验中的总负载。

电源输入：三相五线 AC 380V±10%　50Hz。

固定交流电源：三相四线 380V，接插式与插座式，单项 220V，接插式与插座式。

可调交流输出：0～250V。

直流：110V，0～220V。

可调稳压直流电源：±（0～30）V。

1.2.2 常用电工工具

常用电工工具是指一般专业电工都要使用的常备工具。

1．低压验电器

低压验电器又称为验电笔，有笔式和旋具式两种。一般由氖泡、电阻器、弹簧、笔身和笔尖组成。其测试范围为 60～500V。

2．电工刀

电工刀是剥削电线线头、切割木台缺口、削制木榫的专用工具。电工刀刀柄无绝缘保护，故不能带电作业。

此外还有旋具、尖嘴钳，钢丝钳、剥线钳、高压验电笔、活扳手等工具。

1.2.3 常用电工仪器仪表

1．万用表

万用表是电工测量中最常用的多功能仪表。它的基本用途是测量交、直流电压和直流电流及电阻等参数。有模拟式和数字式万用表两种。

2．兆欧表

兆欧表俗称“ 摇表 ”，其用途是测量电气设备的绝缘电阻。如相与相之间、相对地之间的绝缘电阻。

3．钳形电流表

钳形电流表能在不停电的情况下测量交流电流。

4．直流单臂电桥

直流单臂电桥是一种专门用来测量 1Ω 以上电阻的较精密的仪表。

5．交、直流电压和电流表

可以变换量程的交、直流电压和电流表，主要用做电路中检测线路电压、电流参数值。

1.2.4 电工实训室操作规程及要求

严格遵守电工实训室的操作规程：是做好实验、完成实训课题、确保人身和设备安全的必

要保证。

（1）实验前认真阅读讲义，明确实验（实训）的目的和任务，掌握实验中的方法和步骤；

（2）熟悉实验设备及安全用电规则；

（3）合理选择实验仪器仪表的类型和量程，了解其使用方法；

（4）正确选用电源，严格遵守用电规程，严禁人体接触不绝缘的带电部位；

（5）实验中应“先接线后通电，先断电再拆线”；

（6）实验中如有故障，应立即断电，并请老师检查，故障排除后方可再做实验；

（7）认真做好实验中的各项记录，完成实验报告；

（8）实验结束后必须切断电源，并搞好环境卫生，填写设备使用记录。

1.3　电气火灾的防范及扑救常识

电气火灾不仅直接造成电气设备的毁坏和人身的伤亡，而且还可能造成大规模或长时间的停电，带来不可估量的间接损失，因此电气火灾对国民经济和人民生活的危害极大。

1.3.1　电气火灾的一般原因

电气火灾是由于电气原因导致的失控、较大范围的燃烧。引起火灾的原因是多种多样的，其产生的主要原因有以下四个方面。

（1）线路短路、过载、接触不良；

（2）电气设备散热不良、铁芯发热；

（3）电火花和电弧及静电放电；

（4）电热和照明设备使用时不注意安全要求。

1.3.2　电气火灾的防范及扑救常识

电气火灾的防范主要是避免电气运行中产生火花、电弧和高温，电气设备的检查和管理是防止电气火灾发生的最有效的方法。电气火灾一旦发生，首先应先切断电源，然后再扑救。切断电源后的电气火灾，可按一般性火灾组织人员扑救，同时向公安消防部门报警，若情况十分危急或无断电条件，则只好带电灭火。带电灭火时，应注意救火人员与带电体之间要保持足够的安全距离，并使用不导电灭火剂，如二氧化碳、四氯化碳、1211 和干粉灭火剂。

1.4　安全用电常识

随着时代的变迁，社会的进步，人们的生活水平不断提高，家用电器也不断增加，但人们是否也会更懂得安全用电呢？相信不是每个人都会清楚地知道一些有关安全用电的知识。但是不懂得安全用电知识就容易造成触电身亡、电气火灾、电器损坏等意外事故，所以，“安全用电，性命攸关”。下面首先介绍发生触电事故的一般原因。

1.4.1　触电事故的一般原因

触电事故的一般原因有以下三种。

（1）缺乏安全用电知识。例如，在高压线附近放风筝；爬上高压电杆掏鸟巢；低压架空线

路断线后，不停电用手去搭火线；黑夜带电接线手摸带电体；用手摸破损的胶盖刀闸等。

（2）电气设备不符合安全规程。例如，设备不合格，安全距离不够；二线一地制接地电阻过大；接地线不合格或接地线断开；绝缘破坏导线裸露在外等。

（3）没有普遍推行安全工作制度。例如，违反操作规程，带电连接线路或电气设备而又未采取必要的安全措施；触及破损的设备或导线；误登带电设备；带电接照明灯具；带电修理电动工具；带电移动电气设备；用湿手拧灯泡等。

1.4.2 常见的触电方式

触电事故是人体触及带电体的事故，其实质是电流流过人体时，对人体产生的生理和病理的伤害。按照人体触及带电体的方式和电流通过人体的途径，触电可分为如下三种方式。

1．单相触电

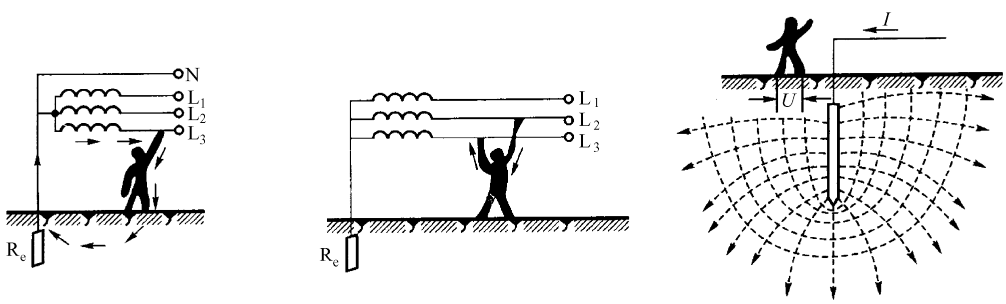
单相触电是指人体触及一相带电体所引起的触电事故，如图 1-1（a）所示。单相触电的危险程度与电网运行方式有关。一般情况下，接地电网里的单相触电比不接地电网里的危险性更大。

2．两相触电

两相触电是指人体同时触及两相带电体所引起的触电事故，如图 1-1（b）所示。两相触电要比单相触电的后果严重得多。

3．跨步电压触电

跨步电压触电是指高压导线断落在地，人们从此经过时，在人体两脚之间产生的跨步电压而引起的触电事故，如图 1-1（c）所示。



（a）单相触电　　（b）两相触电　　（c）跨步电压触电

图 1-1　触电方式

1.4.3 电流对人体的伤害*

1．电流对人体的伤害方式

电流对人体的伤害方式可分为电伤和电击。

电伤是电流对人体造成的外伤。例如，电弧的灼伤、金属在大电流下熔化、飞溅而使皮肤受伤害等。而电击是由于电流通过人体内而造成的内部器官（如心脏、呼吸器官、神经系统等）在生理上的反应和病变。电击是最危险的触电事故。

2．电流对人体的伤害程度与哪些因素有关

实践证明：电流对人体的伤害程度与通过人体的电流大小、通电时间长短、电流流过人体

的途径、电流的种类以及触电者的身体状况等多种因素有关。

1）电流的大小

通过人体的电流越大，人体的生理反应就越强烈，对人体的伤害也就越大。按照人体对电流的生理反应强弱和电流对人体的伤害程度，可将电流划分为以下三级。

（1）感知电流：是引起人们感觉的最小电流。实验资料表明，对于不同的人，感知电流的大小也不相同。成年男性的平均感知交流电流约为 1.1mA，平均感知直流电流约为 5.2mA；成年女性的平均感知交流电流约为 0.7mA，平均感知直流电流约为 3.5mA。

（2）摆脱电流：人体触电后能自主摆脱电流的最大值。实验资料表明，对于不同的人，摆脱电流的大小也不相同。成年男性的平均摆脱交流电流约为 16mA，平均摆脱直流电流约为 76mA；成年女性的平均摆脱交流电流约为 10.5mA，平均摆脱直流电流约为 51mA。

（3）致命电流：在较短时间内危及生命安全的最小电流。一般交流电为 50mA。

人体允许电流：一般情况下，摆脱电流可视为人体的允许电流。在装有防止触电速断器保护装置的电路中，人体允许电流按 30mA 考虑。

2）通电时间长短

触电致人死亡的生理现象是心室颤动。实验证明：通电时间越长，越容易引起心室颤动，电击危险性越大。另外，电流通过人体的时间越长，电流的热效应将会使人体出汗，从而使人体的电阻逐渐减小，这时流过人体的电流逐渐增大，使触电者伤害更加严重。

3）电流流过人体的途径

实验证明：左手触电，电流通过左手到胸部，电流途径心脏且电流的路径比较短，因此这是最危险的。右手触电，电流避开心脏，因此对人体的伤害要小一些。

4）电流的种类

直流电流和交流电流对人体都有伤害作用。实验证明：同样大小的交流电流要比直流电流对人体的伤害严重得多；对于同样大小的交流电来说，频率为 25～300Hz 的交流电对人体的伤害最严重。

5）触电者的身体状况

根据欧姆定律可知，当人体触及的电压一定时，人体电阻越大，触电对人体的伤害程度就越小。人体电阻的变化范围较大，一般由皮肤电阻决定，工程上取值为 1700Ω。

1.4.4 防止触电的保护措施

触电事故往往发生得很突然，而且在极短的时间内造成极为严重的后果，因此必须非常重视触电的防护工作。常用的安全用电措施有以下几种。

1．安全电压

安全电压是为了防止触电事故而采用的、由特定电源供电的电压系列，这个电压系列的上限值，在任何情况下，两导体之间或者任意一根导线与地之间均不得超过交流有效值 50V。

安全电压额定值的等级一般有 42V、36V、24V、12V、6V 五个等级。

通常采用隔离变压器作为安全电压的电源。除此以外，具有同等隔离能力的发电动机、蓄电池、电子装置等均可做成安全电压电源。

2．安全色标

国家规定的安全色有红、蓝、黄、绿四种颜色。红色表示禁止、停止；蓝色表示指令、必

须遵守的规定；黄色表示警告、注意；绿色表示指示、安全状态、通行。

电气上用黄、绿、红三色表示 U、V、W 三个相序，涂成红色的电器外壳是表示其外壳有电，灰色的电器外壳是表示其外壳接地或接零，线路上黑色代表工作零线，用黄绿双色绝缘线代表保护零线。

3．等电位环境

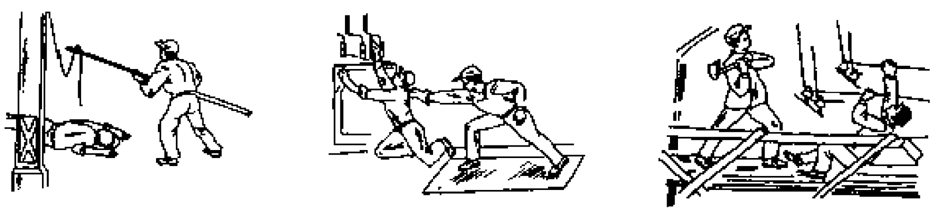
把所有容易同时接近的裸露导体（包括设备以外的裸露导体）互相连接起来，以防止危险的接触电压。等电位范围不应小于可能触及带电体的范围。

另外，防止触电的保护措施还有保护接地、保护接零和漏电保护器等，我们将在第 7 章中重点介绍。

1.4.5 触电急救

触电事故具有偶然性、突发性的特点，令人猝不及防。如果延误时机，死亡率会很高。通过研究发现触电后，1 分钟内进行抢救的，救活率达 90%，6 分钟内进行救治的，救活率达 10%，12 分钟以后救治的，救活率则很小。因此当发现身边有人触电时，应立即使触电者迅速脱离电源，然后现场进行救治。

脱离低压电源的方法可用“挑”、“拉”、“切”三个字来概括。“挑”就是用具有良好绝缘的物品将触电者身上的电线挑开；“拉”就是就近拉开电源开关；“切”就是用带有绝缘柄的利器切断电源线，如图 1-2 所示。



（a）将触电者身上的电线挑开　（b）将触电者拉离电源　（c）用带绝缘柄的工具切断电缆

图 1-2　使触电者脱离电源的方法

触电者脱离电源后，应根据触电者的具体情况，迅速对症救护。现场应用的主要救护方法有口对口人工呼吸法和胸外心脏按压法。

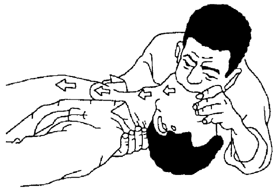
1．口对口人工呼吸法（适用于有心跳无呼吸者）

其口诀为：人仰卧，清口腔，鼻孔朝天头后仰；松衣领，解衣扣，预防气流不通畅；紧捏鼻，贴嘴吹，吹二（秒）放三为适当。依次进行不能停，直至呼吸复正常，如图 1-3 所示。

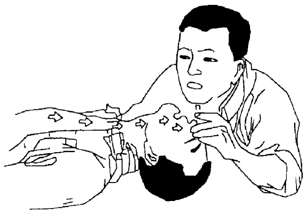
2．胸外心脏按压法（适用于有心跳无呼吸者）

其口诀为：人仰卧，硬地床，让头尽量向后仰；松开衣扣解裤带，跨在伤者胯两旁；中指对凹膛，当胸一手掌；两手叠放乳头间，掌根按压用力量；胸陷一寸到寸半，每秒一次为适当；掌根抬时莫离身，直至心跳复正常。如图 1-4 所示为胸外心脏按压法的正确压点（区）。

当触电者出现呼吸与心跳均已停止出现假死现象时，应使用口对口人工呼吸法与胸外心脏按压法交叉进行抢救。



（a）吹气



（b）换气

图 1-3　口对口人工呼吸法

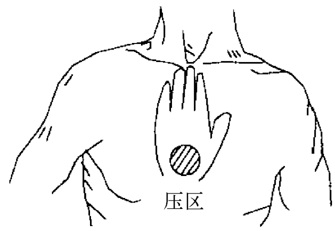


图 1-4　胸外心脏按压法的正确压点（区）

1.5 技能训练 1　认识电工实训室

1.5.1 技能训练目标

（1）了解电工实训室的电源配置、常用电工电子仪器仪表和工具的类型及应用。

（2）掌握实训室操作规程及安全用电的规定。

（3）了解人体触电的类型及常见原因，掌握防止触电的保护措施。

（4）掌握电气火灾的防范及扑救常识。

1.5.2 技能训练仪器与器件

随着科学技术的不断发展，电工电子技术已渗透众多专业领域，成为学生必须掌握的一项技能。而实验课是本专业教学的重要环节，科学地进行实验是工程技术人员必备的技术素养。为突破传统的学科教育对学生技能培养的局限，本书从提高学生的全面素质出发，注重应用技术的传授，突出电工电子技能操作，从而培养学生的动手能力，以及在实践中分析和解决问题的能力。

电工实验室作为学生实验、实训的场所，应配备足够的实验、实训设备。实验室面积、安全装置应符合安全规定，同时还应有相应的实验室规则、日常制度和注意事项等。

根据教学实验项目的需要，实验室的电源应满足教学实验及安全要求。实验设备所用的电源应有最基本的各种安全保护，如短路保护、过载保护、欠压保护、漏电保护和接地保护等。

交流电源的输入容量大于实验中的总负载。

电源输入：三相五线 AC380V±10%，50Hz。

固定交流电源：三相四线 380V 接插式与插座式，单相 220V 接插式与插座式。

可调交流电源输出：0～250V。

直流电源：110V，0～220V。

可调稳压直流电源：±（0～30）V。

查看技能训练用的仪器

1）万用表

万用表是电工测量中最常用的多功能仪表。它的基本用途是测量交、直流电压和直流电流

及电阻等参数。它有模拟式和数字式两种。

2）兆欧表

兆欧表俗称“摇表”，其用途是测量电气设备的绝缘电阻。如相与相之间、相对地之间的绝缘电阻。

3）钳形电流表

钳形电流表能在不断电的情况下测量交流电流。

4）直流单臂电桥

直流单臂电桥是一种专门用来测量 1Ω以上电阻的较精密仪表。

5）交、直流电压和电流表

交、直流电压和电流表俗称“表头”，主要用于检测电路中的线路电压、电流等参数值。

1.5.3 技能训练内容

1．电气火灾的防范及扑救

在教师和学校保卫部门的指导下识别灭火器材，进行灭火演习。

电气火灾的防范主要是避免电气运行中产生火花、电弧和高温。电气设备的检查和管理是防止电气火灾发生的最有效方法。电气火灾一旦发生，应先切断电源，然后再扑救。切断电源后的电气火灾，可按一般性火灾组织人员扑救，同时向公安消防部门报警；若情况十分危急或无断电条件，则只好带电灭火。带电灭火时应注意灭火人员与带电体之间要保持足够的安全距离，并使用不导电灭火剂，如二氧化碳、四氯化碳、1211 和干粉灭火剂。

2．防止触电的保护措施

触电事故往往发生得很突然，并且会在极短的时间内造成极为严重的后果，因此必须非常重视触电的防护工作。常用的安全用电保护措施有以下几种。

1）安全电压

安全电压是为了防止触电事故而采用的由特定电源供电的电压系列。在任何情况下，两导体之间或者任意一根导线与地之间均不得超过这个电压系列的上限值，即交流有效值 50V。

安全电压额定值一般有 42V、36V、24V、12V、6V 五个等级。

通常采用隔离变压器作为安全电压的电源。除此以外，具有同等隔离能力的发电机、蓄电池、电子装置等均可作为安全电压电源。

2）安全色标

国家规定的安全色有红、蓝、黄、绿四种颜色。红色表示禁止、停止，蓝色表示指令、必须遵守的规定，黄色表示警告、注意，绿色表示指示、安全状态、通行。

电气上用黄、绿、红三色表示 U、V、W 三个相序，涂成红色的电器外壳是表示其外壳有电，灰色的电器外壳是表示其外壳接地或接零，线路上黑色代表工作零线，用黄绿双色绝缘线代表保护零线。

3）等电位环境

把所有容易同时接近的裸露导体（包括设备以外的裸露导体）互相连接起来，以防止危险的接触电压。等电位范围不应小于可能触及带电体的范围。

另外，防止触电的保护措施还有保护接地、保护接零和漏电保护器等。

1.5.4 注意事项

实训场地必须做到清洁明亮，实训设备布局合理，并且要悬挂安全文明操作规程或规章制度。在实训中必须严格遵守安全操作规章制度。

只要用电就存在危险！任何侥幸心理都是产生事故的隐患！

严格遵守电工实训室的操作规程是做好实验、完成实训项目、确保人身和设备安全的必要保证。

（1）实验前认真阅读讲义，明确实验（实训）的目的和任务，掌握实验的方法和步骤。

（2）熟悉实验设备及安全用电规则。

（3）合理选择实验仪器仪表的类型和量程，了解其使用方法。

（4）正确选用电源，严格遵守用电规则，严禁人体接触不绝缘的带电部位。

（5）实验中应“先接线后通电，先断电再拆线”。

（6）实验中如有故障应立即断电，并请教师检查，故障排除后方可继续实验。

（7）认真做好实验中的各项记录，完成实验报告。

（8）实验结束后必须切断电源，搞好环境卫生，填写设备使用记录。

★ 电工安全操作规程

1．电工安全知识

（1）电工必须接受安全教育，在身体不适合实验的情况下停止参加。

（2）在安装实验线路进行实训时，必须严格遵守各种安全操作规程中的规定。

（3）在习作电工实训项目时必须穿上电工绝缘胶鞋。

2．实训安全操作规程

（1）将实训设备停电，将各处的电源完全断开。禁止在只经断路器断开电源的设备上进行实训工作。对于多回路的线路，要注意防止其他方面突然来电，特别要注意防止低压方面的反送电。在已断开的开关处挂上“禁止合闸，有人工作”的警示牌，必要时进行加锁。

（2）对实训的设备或线路停电后，应先对设备进行放电，消除实训设备上残留的静电。放电须采用专用的导线进行绝缘操作，人手不得与放电导体接触。应注意线与地、线与线之间均应进行放电。

（3）为防止意外送电和二次系统意外反送电，以及消除其他方面的感应电，在被检修部分外端装设携带型临时接地线。

（4）检修或安装实训完毕后应拆下携带型临时接地线，并且清理好工具及所有边角余料，然后才能通电测试。

1.5.5 思考问题

（1）实训教室的试验台上提供有哪些电源的输出端？有哪些调节旋钮、开关和仪器？

（2）电工电子实训室主要有哪些规章制度和操作规程？

（3）电气火灾的扑救首先要进行什么操作？

1.5.6 实训要求

（1）了解实训室所用仪器仪表的型号并记录名称、铭牌数据、表面标识和编号。

（2）按照技能训练的目标做好本次实训的预习报告。
（3）按电气火灾的扑救消防方法模拟操作，进行灭火演习。
（4）回答思考问题，完成实训报告。

1.6 技能训练 2 触电急救的方法

1.6.1 技能训练目标

（1）掌握检查触电者受伤情况的方法。
（2）掌握口对口人工呼吸的操作方法。
（3）掌握人工胸外心脏按压的操作方法。
（4）掌握心肺复苏法的操作方法。

1.6.2 技能训练仪器和器件

（1）急救挂图或多媒体课件。
（2）急救用器材：急救模拟人；医用消毒酒精；医用消毒棉。

1.6.3 技能训练内容

★ 触电急救法训练

在教师和学校医务部门的指导下进行以下操作。

触电者脱离电源后，应根据触电者的具体情况，迅速对症救护。现场应用的主要救护方法有口对口人工呼吸法和胸外心脏按压法。将触电者（急救模拟人）平放仰卧在干燥结实的地面上。

1．检查触电者是否有自主呼吸

救护人跪在触电者的一侧，将耳朵靠近触电者的口鼻上方，眼睛注视其胸部、腹部，边看胸、腹部有无起伏，边听口鼻有无呼吸的气流声，同时感觉面部有无呼气的气流。如图 1-5 所示检查触电者。应在 5s 内完成上述“看、听、试”动作，并做出判断。

2．检查触电者是否有心跳

救护人用一只手放在触电者前额，使头部保持后仰，另一只手的食指与中指并齐放在触电者的喉结部位，然后将手指滑向触电者颈部气管和邻近肌肉带之间沟内侧的颈动脉，看有无搏动。如图 1-6 所示为人颈部动脉的搏动点。上述动作应在 5～10s 内完成，并做出判断。

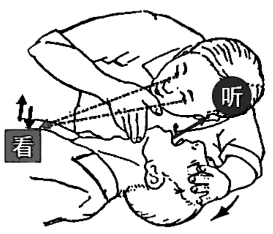


图 1-5 检查触电者示意图



图 1-6 人颈部动脉的搏动点

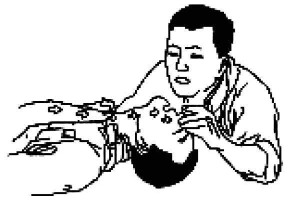
检查颈动脉不可用力压迫，避免刺激颈动脉窦使得迷走神经兴奋反射而引起心跳停止，并且不可同时触摸双侧颈动脉，以防止阻断脑部血液供应。

3．口对口人工呼吸法（适用于有心跳无呼吸者）

其口诀为：人仰卧，清口腔，鼻孔朝天头后仰。松衣领，解衣扣，预防气流不通畅。紧捏鼻，贴嘴吹，吹二（秒）放三为适当。依次进行不能停，直至呼吸复正常，如图 1-7 所示。



（a）吹气



（b）换气

图 1-7　口对口人工呼吸法

口对口人工呼吸的操作如下：

（1）将触电者平放仰卧。

（2）松开触电者的上衣和裤带，使胸、腹部能够自由舒张。

（3）将触电者头部侧向一面，将痰、血块、呕吐物、松脱的假牙等异物清出。

（4）救护人跪在触电者的一侧，一手放在触电者前额上，手掌向后压，另一只手的手指托着上颚向上抬起，使头部充分后仰至鼻孔朝天，防止舌根后坠堵塞气道，如图 1-8 所示。

（5）救护人深吸一口气（800～1200ml）。

（6）救护人一只手放在触电者额上，用拇指和食指将触电者鼻孔捏紧，另一只手托住触电者下颚，使头部固定，救护人低下头，将口贴紧触电者的口，均匀地将刚才深吸的气吹出，时间约为 2s。吹气时目光注视触电者的胸、腹部，吹气正确时，胸部会扩张，如图 1-9 所示。

（7）吹气后随即松开鼻孔，让触电者自行将气呼出，时间约为 3s。触电者呼气时，救护人抬起头准备再次深吸气，触电者呼气完后，救护人紧接着口对口吹气，持续进行抢救。

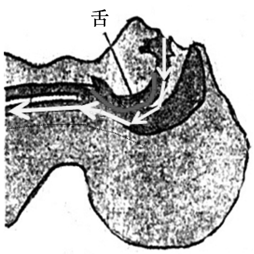


图 1-8　舌根气道示意图



图 1-9　吹气时目光注视示意图

4．胸外心脏按压法（适用于无心跳无呼吸者）

其口诀为：人仰卧，硬地床，让头尽量向后仰。松开衣扣解裤带，跨在伤者胯两旁。中指对凹膛，当胸一手掌。两手叠放乳头间，掌根挤压用力量。胸陷一寸到寸半，每秒一次为适当。掌根抬时莫离身，直至心跳复正常。如图 1-10 所示为胸外心脏按压法的正确压点（区）。

当触电者出现呼吸与心跳均已停止的假死现象时，应使用口对口人工呼吸法与胸外心脏按压法交叉进行抢救。

人工胸外心脏按压操作如下：

（1）将触电者平放仰卧在硬地上，松开紧身衣裤，清净口腔。

（2）救护人跪在触电者的一侧，两手相叠放在胸骨剑突下沿两手指宽上方，手掌贴紧胸部，

手指稍翘起不要接触胸部（见图 1-11）；为了减少抢救者疲劳，抢救者处的位置应合适。正确的位置应在伤患者的头与胸部之间，双膝盖稍分开，双肩膀要绷直。

（3）救护人腰稍向前弯，上身略向前倾，使双肩在伤患者胸骨正上方，肘关节伸直，双臂膀垂直于胸部，以髋关节为支点，利用上半身的重量和肩、臂部肌肉的力量，垂直向下按压胸骨。这样既能按压心脏，又便于肺部呼吸。按压时，掌根垂直均匀用力向下按压，压陷深度为：成年人 4～5cm，儿童 2.5～3.5cm（见图 1-11）。



图 1-10　胸外心脏按压法的正确压点（区）

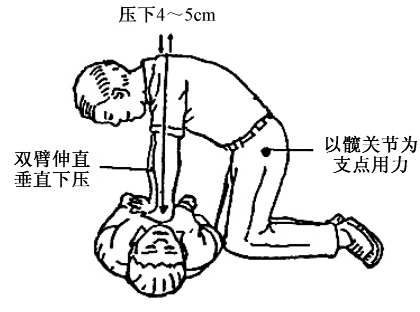


图 1-11　救护人人工胸外心脏按压操作示意图

（4）压陷后立即放松掌根使胸部恢复原状，但掌根不要离开胸部，保证下次按压时位置正确；心脏按压必须平稳有规律地进行。不能间断，不能猛压猛松。因为猛压猛松容易引起血流骤喷，损伤二尖瓣及三尖瓣，而搏出量并不增加。

（5）按压频率以成人 80～100 次每分钟的频率节奏均匀地反复挤压，按压与放松的时间相等。

5．现场心肺复苏法操作

1）单人操作

人工呼吸和心脏按压交替进行，每做 2 次人工呼吸再挤压心脏 30 次，反复进行。进行单人心肺复苏 1min 后，由旁边第二人协助检查颈部是否恢复搏动（无第二人时，自己检查），抢救者自己通过视、听、感觉来判断呼吸是否恢复。以后每 4～5min 检查一次。

2）双人操作

一个人进行人工呼吸并判断触电者有否恢复自主呼吸和心跳，另一人进行心脏按压，反复进行。在吹气时不能按压。按压与人工呼吸之比为 30∶2，即 15 次心脏按压和 1 次人工呼吸交替进行。按压间歇期不再使胸部受压，使心脏充盈。按压开始后不可中断 5s 以上。

心肺复苏时，由按压者数口诀：1 次，2 次，3 次，4 次，…人工呼吸者打开气道做准备，每当口诀数完第 4 次时，人工呼吸者开始深吸一口气，在按压者数完第 5 次时吹一口气，此时正值按压者松手，气体易于吹入肺内，可以看到（按压者可以感觉到）胸廓膨起。然后按压者再按压 5 次、人工呼吸者再吹气一次，如此反复进行。

1.6.4　注意事项

（1）抢救过程中要注意观察触电者的变化，每隔数分钟检查一次是否恢复自主心跳、呼吸。

（2）如果恢复呼吸，则停止吹气。

（3）如果恢复心跳，则停止按压心脏。

（4）如果心跳呼吸都恢复，则可暂停抢救，但要密切注意呼吸和脉搏的变化。

1.6.5 思考问题

（1）口对口人工呼吸操作应注意哪些事项？
（2）人工胸外心脏按压操作应注意哪些事项？
（3）单人操作心肺复苏法操作应注意哪些事项？
（4）双人操作心肺复苏法操作应注意哪些事项？

1.6.6 实训要求

（1）记录本次实训各种触电急救方法的操作要领。
（2）回答思考问题，完成实训报告。
（3）总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 1

1. 电工常用工具一般有哪些？
2. 常用电工仪器仪表一般有哪些？
3. 电工实训室操作的规程及要求是什么？
4. 发生电气火灾的原因是什么？简述电气火灾的扑救方法？
5. 触电事故的一般原因是什么？
6. 常见的触电方式有哪几种？
7. 电流对人体的伤害程度与哪些因素有关？
8. 什么是安全电压？安全电压有哪几个等级？安全电压电源应如何获得？

教学微视频

扫一扫

第2章 直 流 电 路

【本章学习目标】

1. 了解电路的组成，理解电路有关基本物理量的意义，熟记它们的单位和符号。
2. 熟练掌握欧姆定律及其应用。
3. 熟练掌握电阻的串联、并联电路的特点及其应用。
4. 了解电气设备额定值的意义。
5. 掌握基尔霍夫电流定律和电压定律。

【教学目标】

1. 知识目标：了解电路的基本概念，理解欧姆定律和基尔霍夫定律的内涵及应用。
2. 能力目标：通过理论知识的学习和应用，培养综合运用能力。

【教学重点】

基尔霍夫定律的内涵及应用。

【教学难点】

基尔霍夫定律方程的意义和应用。

【教学方法】

读书指导法、分析法、演示法、练习法。

2.1 电路的组成、作用及状态

2.1.1 电路和电路图

1. 电路的组成

电流经过的路径称为电路。例如，在日常生活中，把一个灯泡通过开关、导线和干电池连接起来，就组成了一个照明电路。如图 2-1 所示，在这个电路中，把开关合上，电路中就有电流通过，灯泡就能亮起来。

任何一个完整的电路，无论其结构多么复杂，就其基本作用而言，一般都是由电源、负载、开关和导线组成的。

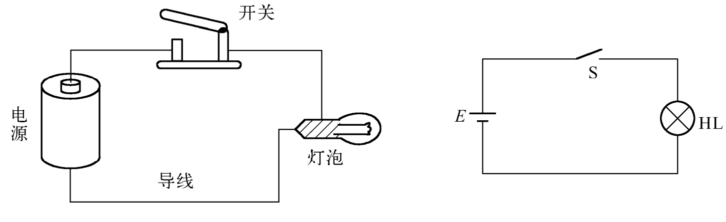


图 2-1 电路的组成

（1）电源：电源是把其他形式的能转换成电能的装置。例如，发电动机可将机械能转换成电能，蓄电池可将化学能转换成电能，光电池可将光能转换成电能，因此，发电动机、蓄电池、光电池等都是电源。

（2）负载：负载是把电能转换成其他形式能量的装置。例如，电灯泡将电能转变成光能，电烙铁将电能转变成热能，扬声器把电能转换成声能，电动机将电能转变成机械能，因此电灯泡、电烙铁、扬声器、电动机等都是负载。

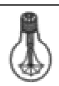
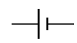
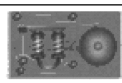
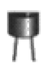
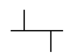
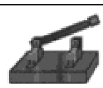
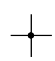
（3）开关：开关是控制电路接通和断开的装置。

（4）导线：导线是用来连接电源和负载的元器件。

2．电路图

如图 2-1（a）所示是用电气设备的实物图形表示的实际电路。它的优点是很直观，但画起来很复杂，不便于分析和研究。因此在设计、安装和维修电气设备时，常用规定的图形符号表示电路连接情况，这个图就称为电路图，如图 2-1（b）所示。国家质量监督检验检疫总局于 2005 年颁布的《电气图用图形符号》（GB/T 4728—2005）对电气图做了具体的规定。几种常用的标准图形符号如表 2-1 所示。

表 2-1　几种常用的标准图形符号

实　物	符　号	实　物	符　号
电灯 		电池、电池组 	
电铃 		电动机 	
二极管 		交叉不连接导线 	
开关 		交叉连接导线 	

2.1.2 电路的作用

实际电路所完成的任务是多种多样的，其作用可归纳为：

（1）实现电能的传输、分配与转换。例如，照明电路将电能转换为光能和热能。

（2）实现信号的传递与处理。如图 2-2 所示的扩音机电路，放大器用来放大电信号，而后传递到扬声器，把电信号还原为语言或音乐，实现“声→电→声”的放大、传输和转换作用。

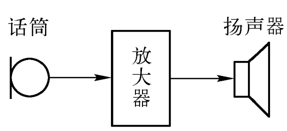


图 2-2　扩音机电路

2.1.3 电路的工作状态

在不同条件下，电路处于不同的状态，主要有以下三种。

1．通路（闭路）

通路是指电源与负载接成闭合回路时的工作状态，这时电路中有电流通过。

2．开路（断路）

开路是指电源与负载未接成闭合回路时的工作状态，这时电路中没有电流通过。在实际电路中，电气设备与电气设备之间、电气设备与导线之间连接时的接触不良也会使电路处于开路状态。

3．短路（捷路）

短路是指电源未经负载而直接由导线（导体）构成通路时的工作状态。短路时，电源输出电流将比允许的通路工作电流大许多倍，电源会因短路而损耗大量的能量，可能烧坏电源和其他设备；所以，应严防电路发生短路。

2.2 电路中的基本物理量

2.2.1 电流

电流是由于电荷的定向移动形成的。物体中形成电流的内因是物体内部有自由电荷；外因是有电场（或者说有电压）作用于物体，两者缺一不可。电路中有持续电流的条件是：

（1）电路为闭合通路（回路）。

（2）电路两端存在电压，电源的作用是为电路提供持续的电压。

电流（I）的大小取决于在一定时间（t）内通过导体横截面的电荷量（Q）的多少，即

$$I=\frac{Q}{t} \tag{2-1}$$

电流的单位是安培，用符号 A 表示。电荷量的单位是库仑，用符号 C 表示。若在 1s 内通过某一导体横截面的电荷量为 1C，则电流就是 1A。除安培以外，电流的常用单位还有千安（kA）、毫安（mA）和微安（μA）。它们之间的换算关系是：

$$1\text{kA}=10^{3}\text{A}$$

$$1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$$

$$1\mu\text{A}=10^{-3}\text{mA}=10^{-6}\text{A}$$

电流不仅有大小，而且有方向。电流的方向规定为正电荷定向运动的方向。

在电路的实际分析计算时，电流的实际方向有时难以确定，这时可假设一个参考方向，并在电路中用箭头标出来。求解后若结果为正值，则说明电流的实际方向与参考方向一致；若结果为负值，则说明电流的实际方向与参考方向相反。

注意：参考方向不一定是实际方向，在选定参考方向之后，电流数值的含义才是完整、正确的。

【例 2-1】如果在 5s 内均匀流过某导体横截面的电荷量为 10C，问：流过该导体的电流是多少毫安？

已知：$Q=10\text{C}$，$t=5\text{s}$，求：I。

【解】

$$I=\frac{Q}{t}=\frac{10}{5}=2\text{（A）}=2000\text{（mA）}$$

电流可分为直流和交流两种。凡大小和方向都不随时间变化的电流，称为直流电流，简称

直流（写作 DC）；凡大小和方向都随时间变化的电流称为交变电流，简称交流（写作 AC）。

电路中电流的大小可以用电流表来测量，测量时必须把电流表串联在电路中。测量前，应分清是直流还是交流，并选择好电流表的量程（测量范围）。使电流从表的“＋”极流入，“－”极流出。

2.2.2 电压

从物理学课程中知道，电荷在电场力的作用下移动，电场力要做功。在电路中，把电场力将单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功称为 a、b 两点间的电压，用 U_{ab} 表示，即

$$U_{ab}=\frac{W_{ab}}{Q} \tag{2-2}$$

式中，W_{ab} 的单位是焦耳，用符号 J 表示，Q 的单位是库仑，用符号 C 表示，U_{ab} 的单位是伏特，用符号 V 表示。在实际使用中，电压还会用到较大的单位，如千伏（kV），及较小的单位，如毫伏（mV）、微伏（μV），它们之间的换算关系如下：

$$1\text{kV}=1000\text{V}$$

$$1\text{V}=1000\text{mV}$$

$$1\text{mV}=1000\mu\text{V}$$

电压和电流一样，不仅有大小，而且有方向，即有正、负。电压的方向由正极指向负极，即由高电位指向低电位；对于负载来说，规定电流流入端为电压的正极，电流流出端为电压的负极；若电压采用双下标表示，则电压的方向为

从第一个下标指向第二个下标，如 U_{ab} 的电压方向为从 a 指向 b（如果 $U_{ab}>0$，则 a 端为正极，b 端为负极；如果 $U_{ab}<0$，则 b 端为正极，a 端为负极）。

电压的方向在电路图中有两种表示方法：一种用箭头表示，如图 2-3（a）所示；另一种用极性符号表示，如图 2-3（b）所示。

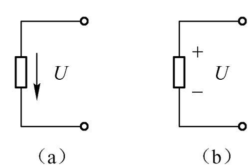


图 2-3　电压的方向

对于负载来说，没有电流就没有电压，有电压就一定有电流。电阻两端的电压被称为电压降。

在电路的实际分析计算时，电压的实际方向有时难以确定，可先任意假定电压的参考方向，列方程求解。若解出的电压为正值，则说明电压的实际方向与参考方向一致；若为负值，则说明电压的实际方向与参考方向相反。

电路中电压的大小可以用电压表来测量。测量前，应分清是直流还是交流，并选择好电压表的量程（测量范围）。测量电压时必须把电压表并联在被测电路的两端，对于测量直流电压，还要使“＋”接线柱接高电位端，“－”接线柱接低电位端。

2.2.3 电位

在电子线路中，经常会遇到需要测量或分析电路中各点与某个固定点之间电压的情况，此时往往把该固定点称为参考点，而把电路中各点与参考点之间的电压称为各点的电位。电位通常用字母 V 表示，如 A 点的电位记作 V_A。电位与电压的单位相同，都是伏特。

参考点的电位规定为零。因此，高于参考点的电位是正电位，低于参考点的电位是负电位。参考点在电路图中常用符号“⊥”表示。当参考点选定以后，电路中各点的电位便有了一个固定的数值。

电路中任意两点间的电位差就等于这两点之间的电压，故电压又称为电位差，即

$$U_{ab}=V_a-V_b \tag{2-3}$$

电路中各点的电位值与参考点的选择有关，即电位具有相对性。当所选的参考点变动时，各点的电位值将随之变动，因此，在电路中不指定参考点而谈论各点的电位是没有意义的。但任意两点间的电压是两点之间的电位差，它与电路中参考点的选择无关，因此，电压具有绝对性。

要计算电路中某点的电位，只要从这一点出发，通过一定的路径绕到参考点，该点的电位即等于此路径上全部元器件（元器件可以是电动势，也可以是电阻）上电压降的代数和。但要注意每一个元器件上电压的正、负值。在绕行过程中，如果绕行方向与某一个元器件上的电压方向相同，则该电压取正值；反之，如果绕行方向与某一个元器件上的电压方向相反，则该电压取负值。

2.2.4 电动势

电动势是描述电源性质的重要物理量。电源电动势与非静电力做的功是密切联系的。非静电力是指除静电力以外能对电荷流动起作用的力。非静电力有不同的来源。在化学电池（干电池、蓄电池）中，非静电力是一种与离子的溶解和沉积过程相联系的化学作用；在一般发电动机中，非静电力起源于磁场对运动电荷的作用，即洛伦兹力。

在电源内部，非静电力把单位正电荷从电源负极移到正极时要对电荷做功，这个做功的物理过程是产生电源电动势的本质，称为电源的电动势，用符号 E 表示，即

$$E=\frac{W_{外}}{Q} \tag{2-4}$$

电动势与电压的单位相同，也是伏特。其方向规定为：在电源内部由电源的负极指向正极，如图 2-4 所示。

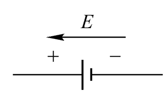


图 2-4 电动势的方向

电动势与电压是容易混淆的两个概念。前面已讲过：第一，电动势是表示非静电力把单位正电荷从负极经电源内部移到正极所做的功，而电压则表示电场力把单位正电荷从电场中的某一点移到另一点所做的功；第二，电动势的方向是由低电位指向高电位，即电位升的方向，而电压的方向是由高电位指向低电位，即电位降的方向；第三，电动势仅存在于电源的内部，而电压不仅存在于电源两端，而且也存在于电源外部。因此它们是完全不同的两个概念。

2.2.5 电阻与电导

1．电阻

电路中对电流通过有阻碍作用并且造成能量消耗的部分称为电阻。电阻常用 R 表示。电阻的单位是欧姆（Ω），也常用千欧（kΩ）或者兆欧（MΩ）做单位。它们之间的换算关系如下：

$$1k\Omega=1000\Omega$$
$$1M\Omega=1000000\Omega$$

2．电阻定律

电阻是导体的固有参数，导体的电阻由导体的材料、横截面积和长度决定。即电气设备一经制造好，其电阻就是一个定值。

实验证明：在一定的温度下，导体的电阻与导体的长度（L）成正比，与导体的横截面

积 S 成反比，并与导体材料的性质（即电阻率 ρ）有关，这一规律就称为电阻定律。用公式表示为：

$$R=\rho\frac{L}{S} \tag{2-5}$$

式中　ρ——电阻率（Ω · m）；

L——导体的长度（m）；

S——导体的横截面积（m^2）；

R——电阻（Ω）。

表 2-2 列出了几种材料在 20℃时的电阻率及主要用途。

【例 2-2】有段铜导线长 3000m，截面积是 $10mm^2$，求这根导线的电阻。

已知：$L=3000m$，$S=10mm^2=1.0\times10^{-5}m^2$。求：$R$。

【解】查表得铜的电阻率 $\rho=1.7\times10^{-8}\Omega\cdot m$

由 $R=\rho\frac{L}{S}$，得

$$R=1.7\times10^{-8}\times\frac{3\ 000}{1.0\times10^{-5}}=5.1\ (\Omega)$$

表 2-2　几种材料在 20℃时的电阻率

	材 料 名 称	电阻率/（ρ/Ω·m）（20℃）
导体	银	1.6×10^{-8}
	铜	1.7×10^{-8}
	铝	2.8×10^{-8}
	钨	5.5×10^{-8}
	镍	7.3×10^{-8}
	铁	9.8×10^{-8}
	锡	1.14×10^{-7}
	铂	1.05×10^{-7}
	锰铜（85%铜＋3%镍＋12%锰）	（4.2～4.8）$\times10^{-7}$
	康铜（58.8%铜＋40%镍＋1.2%锰）	（4.8～5.2）$\times10^{-7}$
	镍铬丝（67.5%镍＋15%铬＋16%碳＋1.5%锰）	（1.0～1.2）$\times10^{-6}$
	铁铬铝	（1.3～1.4）$\times10^{-6}$
半导体	碳	5.5×10^{-5}
	锗	0.60
	硅	2.300
绝缘体	塑料	10^{15}～10^{16}
	陶瓷	10^{12}～10^{13}
	云母	10^{11}～10^{15}
	石英（熔凝的）	75×10^{16}
	玻璃	10^{10}～10^{14}
	琥珀	5×10^{14}

3．电阻与温度的关系

前面介绍了导体的电阻大小取决于它本身的因素，其实，导体的电阻还与自身以外的其他

因素有关。其中，温度就是因素之一。实验证明：导体的温度发生变化，它的电阻也随之发生变化。一般的金属材料，在温度升高后，导体的电阻增大。

4．常用电阻器

在有些无线电设备的电路中，为了控制电路中的电压和电流，或者使放大了的电压或电流表现它的工作效果，需要一种具有一定电阻值的元器件，这种元器件称为电阻器，通常叫“电阻”。常用电阻器外形及图形符号如图 2-5 所示。

电阻器按其阻值可分为固定电阻器（见图 2-5（a））和可变电阻器（见图 2-5（b））；按其结构可分为线绕电阻（见图 2-5（c））和非线绕电阻（如图 2-5（a）所示）。

电阻器的主要指标有标称阻值、允许误差和额定功率。在实际应用中，应根据电阻器的规格、性能等指标，以及在电路中的作用和技术要求等，选择合适的电阻器。

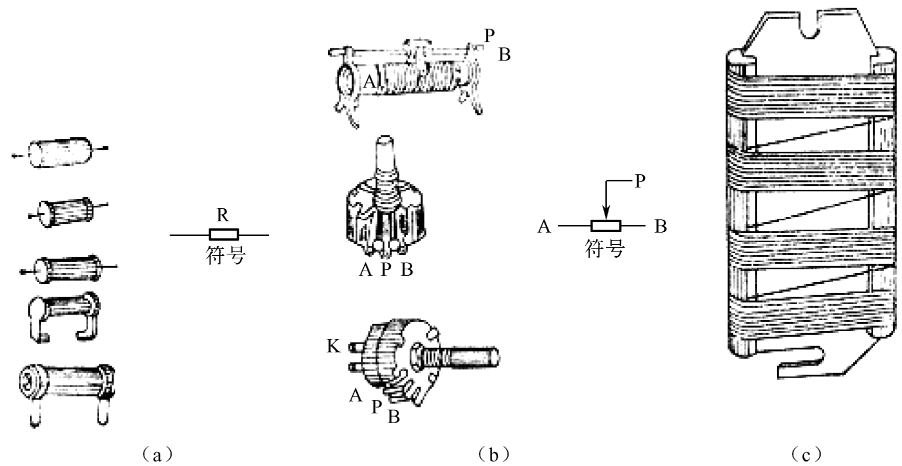


图 2-5　常用电阻器外形及图形符号

5．电导

将电阻的倒数称为电导，用符号 G 表示，单位为西门子（S），即

$$G=\frac{1}{R} \tag{2-6}$$

由式（2-6）可见，导体的电阻越小，电导就越大，导体的导电性能就越好。电导和电阻一样，都是反映了物体的导电能力，只是表示方法不同。

各种材料的导电性能有很大的差异。在电工技术中，各种材料按照它们导电能力的不同可分为导体、绝缘体、半导体和超导体。

（1）导体：导电性能强的材料称为导体，如铜、铝，铁等。

（2）绝缘体：导电性能很差的材料称为绝缘体，如橡胶、塑料等。

（3）半导体：导电性能介于导体和绝缘体之间的材料称为半导体，如锗、硅等。

（4）超导体：在极低温（接近于绝对零度，即-273.15K）状态下，有些金属（一些合金和金属的化合物）电阻突然变为零，这种现象称为超导现象。具有这种特性的物质称为超导体或超导材料。我国在超导理论和超导材料的研究方面，目前已居世界领先地位。超导材料在工业生产、科学研究、医学及测量等许多领域中都有着广泛的应用。

2.3 欧姆定律及其应用

在导体两端加上一个电压，则导体中会产生电流。电流流过导体时，又不可避免地遇到电阻。那么电压、电流和电阻三者之间存在什么关系呢？电路理论中最基本的一条定律——欧姆定律就描述了这种关系。下面分几种具体情况来讨论。

2.3.1 一段无源支路的欧姆定律

在一个完整的电路中，对其中只有电阻而不包含电源的支路称为一段无源支路。如图 2-6 所示，虚线框内的部分就是一段无源支路。

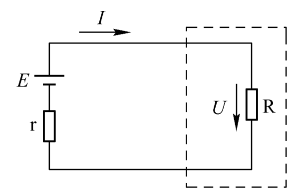


图 2-6　一段无源支路

实验证明：流过一段无源支路的电流 I 的大小与这条支路两端的电压 U 成正比，与这条支路的电阻 R 成反比。这个规律称为一段无源支路的欧姆定律，或称为部分电路的欧姆定律，用公式表示为

$$I=\frac{U}{R} \tag{2-7}$$

式中，若电压 U 的单位为 V，电阻 R 的单位为 Ω，则电流 I 的单位就是 A。

【例 2-3】一个线圈接在 12V 的直流电源上，测出线圈中的电流为 200mA，试求该线圈的电阻是多少。

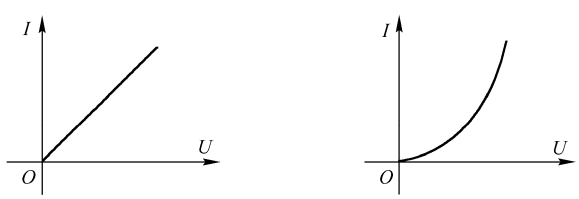
已知：$U=12\text{V}$，$I=200\text{mA}=0.2\text{A}$。求：$R$。

【解】由 $I=\frac{U}{R}$ 可知

$$R=\frac{U}{I}=\frac{12}{0.2}=60\ (\Omega)$$

电阻值不随其两端的电压和流过的电流而改变的电阻称为线性电阻。若画出其上的电流 I 随电压 U 变化的曲线（称为伏安特性曲线），则是一条通过原点的直线，如图 2-7（a）所示。

电阻值随其两端的电压和流过的电流而改变的电阻称为非线性电阻。例如，晶体二极管、晶体三极管的电阻就是非线性电阻，它的伏安特性曲线如图 2-7（b）所示。



（a）线性电阻的伏安特性曲线　（b）晶体二极管的伏安特性曲线

图 2-7　电阻的伏安特性曲线

由线性电阻及其他线性元器件组成的电路称为线性电路。含有非线性元器件的电路称为非线性电路。今后除非特别指出外，一般我们说的电阻都是指线性电阻。

2.3.2 全电路欧姆定律

全电路是指由内电路和外电路组成的闭合电路的整体，如图 2-8 所示。图中的虚线框代表

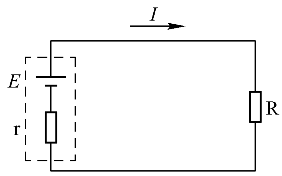


图 2-8　全电路

一个电源的内部电路，称为内电路。r 是电源的内阻（有时直接在电源符号旁边标出 r，而不再画电阻符号），又称为内电阻。电源外部的电路称为外电路。

实验证明：流过闭合电路的电流 I 的大小与电源电动势 E 成正比，与电路中内、外电阻之和（$R+r$）成反比，这个规律称为全电路的欧姆定律，又称为闭合电路的欧姆定律。用公式表示为

$$I=\frac{E}{R+r} \tag{2-8}$$

式中，若电源电动势 E 的单位为 V，外电阻 R 的单位为 Ω，内电阻 r 的单位为 Ω，则电流 I 的单位就是 A。

由闭合电路的欧姆定律 $I=\dfrac{E}{R+r}$ 可知：$IR=E-Ir$，则

$$U=E-Ir \tag{2-9}$$

式中，U 为电源的端电压（即电源两端的电压），Ir 为电源的内电压，也叫内压降。对于确定的电源来说，电动势 E 和内电阻 r 都是一定的，从式（2-9）可以看出，电源的端电压 U 与电路中的电流的关系。电流 I 增大时，内压降 Ir 增大，电源端电压 U 就减小；反之，电流 I 减小时，电源端电压 U 就增大。当电路是闭合电路时，电源的端电压等于外电路两端的电压，即 $U=IR$。当电路开路时，电源的端电压就等于电源电动势。

2.4　电阻的串、并联及其应用

在实际工作中，经常把电阻适当地连接后再进行使用。电阻的连接方式主要有串联、并联和混联三种。

2.4.1　电阻串联电路

1．电阻的串联

把两个或两个以上的电阻，一个接一个地连成一串，构成中间无分支的连接方式，称为电阻的串联，如图 2-9（a）所示。

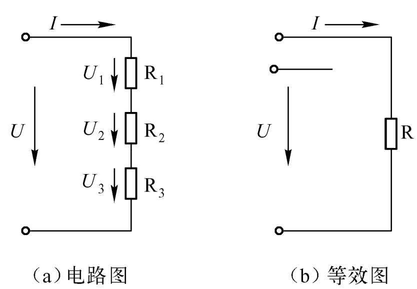


图 2-9　电阻的串联电路

2．电阻串联的特点

（1）串联电路中流过每个电阻的电流都相等，即

$$I_1=I_2=I_3=\cdots=I_n=I \tag{2-10}$$

（2）串联电路两端的总电压等于各电阻两端的电压之和，即

$$U=U_1+U_2+U_3+\cdots+U_n \tag{2-11}$$

（3）串联电路的等效电阻（即总电阻）等于各串联电阻之和，即

$$R=R_1+R_2+R_3+\cdots+R_n \tag{2-12}$$

在分析电路时，为了方便起见，常用一个电阻来表示几个串联电阻的总电阻，这个电阻叫等效电阻。如图 2-9（b）所示就是采用等效电阻后的等效电路。

（4）串联电路消耗的总功率等于各电阻上消耗的功率之和，即

$$P=P_1+P_2+P_3+\cdots+P_n \tag{2-13}$$

（5）串联电路中各电阻上的电压与各电阻的阻值成正比，即

$$U_n=IR_n \tag{2-14}$$

根据欧姆定律 $U=IR$，$U_1=I_1R_1$，…，$U_n=I_nR_n$，可得到$\frac{U_n}{U}=\frac{I_nR_n}{IR}$，再根据式（2-10）可得到

$$U_n=\frac{R_n}{R}U \tag{2-15}$$

式（2-15）通常称为串联电路的分压公式。由此公式可知，在电阻串联电路中，由于流过每个电阻的电流相等，所以阻值越大的电阻分配的电压越大，阻值越小的电阻分配的电压越小。

（6）串联电路中各电阻上消耗的功率与其电阻值成正比。

因为在电阻串联电路中，流过每个电阻的电流相等，由公式 $P=I^2R$ 可知，电阻值越大，其消耗的功率就越大，电阻值越小，其消耗的功率就越小。

3．电阻串联的应用

电阻串联的应用很广泛。在实际工作中，常常采用几个电阻串联构成分压器，使同一个电源能供给几种不同的电压；用小阻值电阻的串联来获得较大的电阻；利用串电阻的方法，限制和调节电路中电流的大小；在电工测量中，用串联电阻来扩大电压表的量程，以便测量较高的电压等。

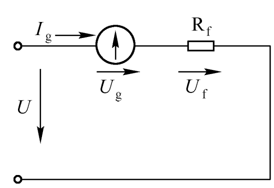


图 2-10　扩大电压表量程

【例 2-4】有一个电流表（见图 2-10），它的满刻度电流 I_g 为 50μA（即允许通过电流表的最大电流），内阻 R_g 为 1kΩ。若把它改装成量程为 100V 的电压表，应串联多大的电阻？

已知：$R_g=1\text{k}\Omega=1000\Omega$，$I_g=50\mu\text{A}=50\times10^{-6}\text{A}$，$U=100\text{V}$。求：$R_f$。

【解】由 $I=\frac{U}{R}$可知

$$U_g=I_gR_g=50\times10^{-6}\times1\,000=0.05\text{（V）}$$

因为

$$U_f=U-U_g=100-0.05=99.95\text{（V）}$$

而在电阻串联的电路中，电流处处相等，即 $I_f=I_g=50\times10^{-6}\text{A}$。

所以

$$R_f=\frac{U_f}{I_f}=\frac{99.95}{50\times10^6}=1.999\times10^6\text{（Ω）}=1.999\text{（MΩ）}$$

2.4.2 电阻并联电路

1. 电阻的并联

把两个或两个以上的电阻的两端分别连接在电路中相同的两点的方式称为电阻的并联，如图 2-11（a）所示。

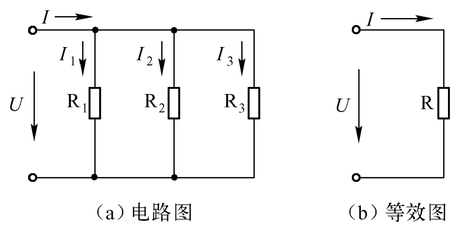


图 2-11 电阻的并联电路

2. 电阻并联的特点

（1）并联电路中各电阻两端的电压相等，即

$$U_1 = U_2 = U_3 = \cdots = U_n = U \tag{2-16}$$

（2）并联电路的总电流等于各支路的电流之和，即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n \tag{2-17}$$

（3）并联电路等效电阻（即总电阻）的倒数等于各并联支路电阻的倒数之和，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n} \tag{2-18}$$

在分析电路时，为了方便起见，常用一个电阻来表示几个并联电阻的总电阻，这个电阻叫等效电阻。图 2-11（b）所示就是采用等效电阻后的等效电路。

（4）并联电路消耗的总功率等于各电阻上消耗的功率之和，即

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n \tag{2-19}$$

（5）并联电路中各电阻上的电流与各电阻的阻值成反比，即

$$I_n = \frac{U}{R_n} \tag{2-20}$$

根据欧姆定律 $U=IR$，$U_1=I_1R_1$，…，$U_n=I_nR_n$ 以及式（2-16）可得到下式：

$$\frac{U_n}{U} = \frac{I_nR_n}{IR}$$

即

$$I_n = \frac{R}{R_n}I \tag{2-21}$$

式（2-21）通常称为并联电路的分流公式。由此公式可知，在电阻并联电路中，由于每个电阻两端的电压相等，所以阻值越大的电阻分配的电流反而越小，阻值越小的电阻分配的电流越大。

（6）并联电路中各电阻上消耗的功率与其电阻值成反比。

因为在电阻并联电路中，加在每一个电阻两端的电压相等，由公式 $P=\frac{U^2}{R}$ 可知，电阻值越

大，其消耗的功率就越小，而电阻值越小，其消耗的功率反而越大。

3．电阻并联的应用

电阻并联的应用也很广泛。在实际工作中，凡是额定电压相同的负载都采用并联的连接方式；有时将大阻值的电阻并联起来配成小阻值电阻以满足电路的需要；在电工测量中，经常在电流表两端并接分流电阻来扩大电流表的量程等。

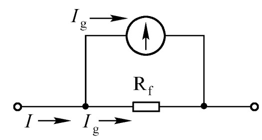


图 2-12　扩大电流表量程

【例 2-5】有一个电流表（见图 2-12），它的满刻度电流 I_g 为 50μA（即允许通过电流表的最大电流），内阻 R_g 为 1kΩ。若把它改装成量程为 1A 的电流表，应并联多大的分流电阻？

已知：$R_g=1\text{k}\Omega=1000\Omega$，$I_g=50\mu\text{A}=50\times10^{-6}\text{A}$，$I=1\text{A}$。求：$R_f$。

【解】由 $I=\dfrac{U}{R}$ 可知

$$U_g=I_gR_g=50\times10^{-6}\times1000=0.05\text{（V）}$$

因为

$$I_f=I-I_g=1-50\times10^{-6}=0.99995\text{（A）}$$

而在电阻并联的电路中，各电阻的端电压相等，即

$$U_f=U_g=0.05\text{（V）}$$

所以

$$R_f=\frac{U_f}{I_f}=\frac{0.05}{0.99995}\approx0.05\text{（}\Omega\text{）}$$

2.4.3　电阻混联电路

在实际应用中，使用更多的是电阻的混联电路，即在同一个电路中，既有电阻的串联，又有电阻的并联，如图 2-13 所示。

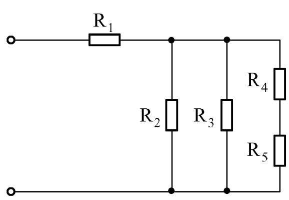


图 2-13　电阻混联电路

对于电阻混联电路的计算，只要按电阻的串联和并联的计算方法，一步一步地把电路化简，最后就可以求出其总的等效电阻了。判别混联电路的串、并联关系应掌握以下三种方法。

（1）看电路的结构特点。

若两电阻首尾相接就是串联；若首首尾尾相接就是并联。如图 2-13 所示，R_2 与 R_3 首首尾尾相接，是并联；而 R_4 与 R_5 是首尾相接，因此是串联。

（2）看电压、电流的关系。

若流经两个电阻的电流是同一个电流，就是串联；若两个电阻上承受的是同一个电压，就是并联。如图 2-13 所示，R_2 与 R_3 承受相同的电压，因而是并联；而 R_4 与 R_5 流过相同的电流，因此是串联。

（3）对电路做变形等效。

对电路结构进行分析，选出电路的节点。以节点为基准，将电路结构变形，然后进行判别。

【例 2-6】如图 2-14（a）所示，已知 $R_1=8\Omega$，$R_2=4\Omega$，$R_3=R_4=R_5=12\Omega$，求其等效电阻 R_{AB}。

【解】由图（a）可知：R_3、R_4 和 R_5 首首尾尾相接，是并联，因此这 3 个电阻可以用一个等效电阻 R_{345} 来代替，其大小为

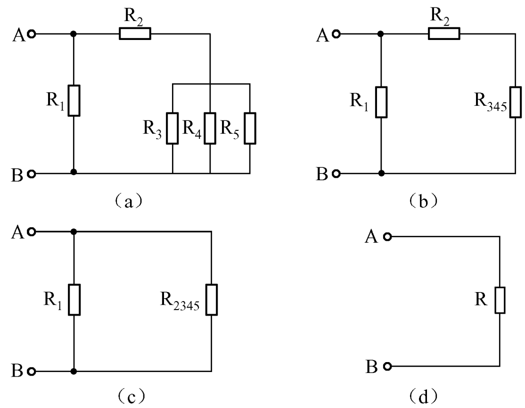


图 2-14　例 2-6 电路图

$$R_{345}=\frac{1}{\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_5}}=\frac{1}{\frac{1}{12}+\frac{1}{12}+\frac{1}{12}}=4\ (\Omega)$$

等效电路图如图 2-14（b）所示。

由图 2-14（b）可知，R_2 和 R_{345} 首尾相连，是串联，因此这两个电阻可以用一个等效电阻 R_{2345} 来代替，其大小为

$$R_{2345}=R_2+R_{345}=4+4=8\ (\Omega)$$

等效电路图如图 2-14（c）所示。

由图 2-14（c）可知，R_1 和 R_{2345} 首首尾尾相连，是并联，因此这两个电阻可以用一个等效电阻 R 来代替，其大小为

$$R=\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_{2345}}}=\frac{1}{\frac{1}{8}+\frac{1}{8}}=4\ (\Omega)$$

等效电路图如图 2-15（d）所示。

以上介绍的等效变换方法，并不是唯一求解等效电阻的方法，诸如倒退法、标点法等都可以求解混联电路的等效电阻。但无论哪一种方法，都是将不容易看清串、并联关系的电路，等效为可以直接看出串、并联关系的电路，然后求出其等效电阻的值。

2.5　电能与电功率

2.5.1　电能

电流流过灯泡，灯泡会发光；电流流过电炉丝，电炉丝会发热；电流流过电动机，电动机会运转。可见电流流过一些用电设备时是会做功的，电流所做的功称为电功。电功即电路所消耗的电能，用符号 W 表示。

前面讲述电压时说过，如果 a、b 两点间的电压为 U，则将电荷量为 Q 的电荷从 a 点移到 b 点时电场力所做的功为

$$W=UQ \tag{2-22}$$

由于

$$I=\frac{Q}{t}$$

所以 $$Q=It$$

则 $$W=IUt$$

又因为 $$I=\frac{U}{R}$$

所以 $$W=IUt=\frac{U^2}{R}t=I^2Rt \tag{2-23}$$

式中，电压的单位为 V，电流的单位为 A，电阻的单位为 Ω，时间的单位为 s，则电能的单位为焦耳（J）。工程上常用千瓦时（kW · h，俗称“度”）做单位，它们的换算关系为

$$1\text{kW}\cdot\text{h}=3.6\times10^6\text{J}$$

2.5.2 电功率

电流需要通过一些用电设备才能做功。为了衡量这些设备做功能力的大小，引入一个电功率的概念。我们把单位时间内电流所做的功称为电功率，用符号 P 表示，即

$$P=\frac{W}{t} \tag{2-24}$$

由于 $$W=IUt=\frac{U^2}{R}t=I^2Rt$$

所以 $$P=\frac{W}{t}=IU=\frac{U^2}{R}=I^2R \tag{2-25}$$

若电能的单位为 J，时间的单位为 s，则电功率的单位为瓦（W），在实际使用中还会用到千瓦（kW）和毫瓦（mW），它们之间的换算关系如下

$$1\text{kW}=1000\text{W}$$

$$1\text{W}=1000\text{mW}$$

【例 2-7】有一个 220V、40W 的电灯，接在 220V 的电源上，试求通过电灯的电流和电灯在 220V 电压下工作时的电阻。如果电灯每晚使用 3h，求：一个月（30 天）消耗多少电能？

已知：$U=220\text{V}$，$P=40\text{W}$，$t=3\text{h}\times30=90\text{h}$。求：$I$、$R$、$W$。

【解】由 $P=IU$ 得

$$I=\frac{P}{U}=\frac{40}{220}=0.18\text{（A）}$$

由 $P=\frac{U^2}{R}$可知

$$R=\frac{U^2}{P}=\frac{220^2}{40}=1210\text{（Ω）}$$

由 $P=\frac{W}{t}$可知

$$W=Pt=40\times10^{-3}\times90=3.6\text{（度）}$$

2.5.3 焦耳定律

电流通过金属导体时，导体会发热，这种现象称为电流的热效应。电热毯、电饭锅、电熨斗等家用电器都是利用电流的热效应工作的。

实验证明：电流通过金属导体时，导体产生的热量与电流的平方、导体的电阻以及通电时间的长短成正比。这一规律称为焦耳定律，用公式表示为

$$Q=I^2Rt \tag{2-26}$$

若电流的单位为 A，电阻的单位为 Ω，时间的单位为 s，则热量 Q 的单位就是 J。

2.5.4 负载的额定值*

电流的热效应应用非常广泛，利用电流的热效应制成了很多的电热设备。但电流的热效应也有有害的一面。例如，电流通过导线、电动机、变压器时，会使导线和电动机、变压器的线圈发热。这不但使能量白白地浪费掉，还可能会造成温度升高，加速绝缘材料的老化变质，从而缩短了电气设备的使用寿命，甚至导致设备漏电、烧毁。所以制造厂生产的各种电气设备都规定了电压、电流或功率的额定值，使用时必须注意。将电气设备和元器件长期安全工作时所允许的最大电流、最大电压和最大功率分别称为额定电流、额定电压和额定功率。例如，常见的灯泡上标明的“220V 40W”，就是指该灯泡的额定电压为 220V，额定功率为 40W。家用电器和电动机的额定值通常标在其外壳的铭牌上，故有时也把额定值称为铭牌数据。

电器元器件和设备在额定功率下的工作状态称为额定工作状态，也称满载；低于额定功率的工作状态称为轻载；高于额定功率的工作状态称为过载或超载。电气设备在过载状态运行时很容易被烧坏，一般不允许过载。熔断器、热继电器都是常用的过载保护电器。

【例 2-8】一个 1kΩ，10W 的电阻器，允许流过的最大电流是多少？若把它接到 110V 的电源两端，能否安全工作？

已知：$R=1\text{k}\Omega=1000\Omega$，$P_{\text{N}}=10\text{W}$。求：$I_{\text{N}}$。

【解】由 $P=I^2R$ 得

$$I_{\text{N}}=\sqrt{\frac{P_{\text{N}}}{R}}=\sqrt{\frac{10}{1000}}=0.1(\text{A})$$

当该电阻器接到 110V 的电源两端时

由 $I=\dfrac{U}{R}$可知

$$I=\frac{110}{1000}=0.11\ (\text{A})$$

因为 $I=0.11\text{A}>I_{\text{N}}$，所以该电阻器接到 110V 的电源两端时将会被烧毁。

2.6 基尔霍夫电流定律和电压定律

只有单个回路，或者能用电阻串、并联的方法化简成为单个回路的电路称为简单直流电路。简单直流电路用欧姆定律即可求解。但在电子电路中，常会遇到两个以上的有电源支路，如图 2-15 所示，此时不能运用电阻串、并联的计算方法将它简化成一个简单直流电路，这种电路称为复杂直流电路。复杂直流电路的求解仅有欧姆定律是不够的，还需应用基尔霍夫定律。

2.6.1 概述

基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律（KCL）和基尔霍夫电压定律（KVL）。它反映了电路中所有支路电流和电压所遵循的基本规律，它和欧姆定律一样是电路中最基本的规律。在介绍基尔霍夫定律之前，先把有关电路结构的几个名词简述如下。

1．支路

电路中的每一个分支称为支路。如图 2-15 所示的 CAD、CD 和 CBD 都是支路。每一条支路中各处电流相等，称为支路电流。

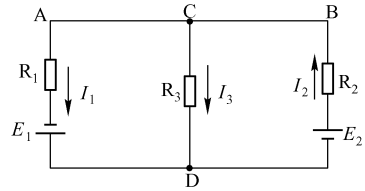


图 2-15　电路图

2．节点

电路中三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 2-15 中的点 C 和点 D 都汇集了三条支路, 即点 C 和点 D 称为节点。

3．回路

电路中由一条或多条支路所组成的闭合电路称为回路（闭合电路是指沿着电路中某些支路绕行，能形成一个闭合的通路）。图 2-15 中有三个回路：ACDA、CBDC 和 ACBDA。

4．网孔

电路中的回路内部不含有支路的回路称为网孔。在图 2-15 中, 回路 ACDA 和回路 CBDC 因回路内部不含有支路，故称为网孔，而回路 ACBDA 因回路中含有支路，则该回路就不是网孔。

2.6.2　基尔霍夫电流定律（KCL）

基尔霍夫电流定律也称基尔霍夫第一定律，是用来确定连接在同一个节点上的各支路电流的关系的。具体内容是：在任一时刻，流入某一个节点的电流之和恒等于从这一个节点流出的电流之和，即

$$\sum I_{入}=\sum I_{出} \tag{2-27}$$

如图 2-15 所示，I_1 和 I_3 是流入节点 D，而 I_2 是流出节点 D 的，根据基尔霍夫电流定律，则

$$I_1+I_3=I_2$$

或

$$I_1+I_3-I_2=0$$

如果规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，则基尔霍夫定律也可写成

$$\sum I=0 \tag{2-28}$$

即在任一电路的任一节点上，电流的代数和永远等于零。

【例 2-9】如图 2-16 所示的闭合面包围的是一个三角形电路，它有 3 个节点。求：流入闭合面的电流 I_A、I_B、I_C 之和是多少？

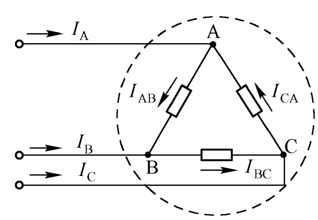


图 2-16　电路图

【解】应用基尔霍夫电流定律可列出

$$I_A=I_{AB}-I_{CA}$$
$$I_B=I_{BC}-I_{AB}$$
$$I_C=I_{CA}-I_{BC}$$

上列三式相加可得

$$I_A+I_B+I_C=0$$

即

$$\sum I=0$$

可见，在任一瞬时，通过任一闭合面的电流的代数和也恒等于零。由上面的例子可知：节

点电流定律不仅适用于节点，还可推广应用到某个封闭面。

2.6.3 基尔霍夫电压定律（KVL）

基尔霍夫电压定律也称基尔霍夫第二定律，是用来确定一个回路中各段电压之间关系的。具体内容是：在任一瞬间，沿电路中的任一回路，各段电压的代数和恒等于零，即

$$\sum U=0 \tag{2-29}$$

在应用 KVL 列电压方程时，应注意：

（1）首先选取回路的绕行方向（回路的绕行方向可按顺时针方向，也可按逆时针方向，通常选择顺时针方向）。

（2）确定各段电压的参考方向。规定：凡电压的参考方向和回路的绕行方向一致时，该电压取正值；反之，电压取负值。

【例 2-10】如图 2-17 所示，列出回路 ABCDEFA 的基尔霍夫电压定律表达式。

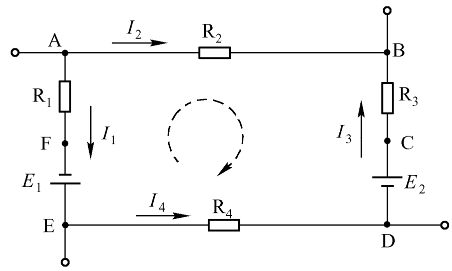


图 2-17　例 2-10 电路图

【解】假设该回路的绕行方向如图 2-17 所示，则应用基尔霍夫电压定律可列出

$$U_{AB}+U_{BC}+U_{CD}+U_{DE}+U_{EF}+U_{FA}=0$$

因为：

$$U_{AB}=I_2R_2$$
$$U_{BC}=-I_3R_3$$
$$U_{CD}=E_2$$
$$U_{DE}=-I_4R_4$$
$$U_{EF}=E_1$$
$$U_{FA}=-I_1R_1$$

所以 $$I_2R_2-I_3R_3+E_2-I_4R_4+E_1-I_1R_1=0$$

移项后得 $$E_1+E_2=I_1R_1-I_2R_2+I_3R_3+I_4R_4$$

上式表明：在任一时刻，一个闭合回路中，各电源电动势的代数和恒等于各电阻上电压降的代数和，即

$$\sum E=\sum IR \tag{2-30}$$

注意：

在应用公式 $\sum U=0$ 时，电压、电动势均集中在等式的一边，各段电压的正、负号规定与 2.2 节中所述一样；但如果应用公式 $\sum E=\sum IR$ 时，电压与电动势分别写在等式的两边，则电压的正、负号规定仍与前面相同，而电动势的正、负号恰好相反，也就是当绕行方向与电动势的方向（由负极指向正极）一致时，该电动势为正，反之为负。这是因为公式 $\sum U=0$ 中，电动势是作为电压来处理的，而在公式 $\sum E=\sum IR$ 中，电动势则是作为电动势来处理的。

2.7　技能训练 3　直流电流表与直流电压表的正确使用

2.7.1　技能训练目标

（1）熟悉实验室设备配置，学习实验室的规章制度，了解安全用电常识，培养安全用电习惯。

（2）学习电流、电压的测量方法，练习使用直流电流表、电压表。

（3）通过实验加深对电路中电位、电压的概念及其相互关系的理解。

2.7.2　技能训练仪器与器件

（1）可调直流稳压电源（0～30V）。

（2）直流电流表（0～200mA）；直流电压表（0～200V）。

（3）1.5V 干电池一节。

（4）电位、电压测定实验电路板。

2.7.3　技能训练内容与步骤

1．直流电流表和直流电压表的使用

直流电流表、电压表一般采用磁电系结构，它们是根据通电导体在磁场中产生电磁力的原理工作的。实验中要十分注意直流电流表和直流电压表的正确接线、正确选择量程、正确读取仪表的指示值。

（1）使用电流表测电流时应将电流表串联在被测电路中，使被测电流流过电流表；使用电压表测电压时应将电压表并联在被测电路中，使被测电压加在电压表的两端。

（2）单向偏转的直流仪表都有一个测量参考方向的问题，其测量参考方向都是从仪表的“＋”端钮至仪表的“－”端钮。实验中，应遵循这一测量参考方向。

（3）要选择合适的仪表量程。实验中，指针不应超过满刻度，同时要尽量使仪表偏转角度达到满量程的 2/3。

（4）使用仪表时，应努力使仪表在正常工作条件下进行测量，以便减小不必要的附加误差。

（5）要正确读取仪表指示值。

2．直流电路电流、电压和电位的测量

（1）分析图 2-18，合理设置实验参数、选择仪表量程，并正确接线。

（2）闭合开关 S，直接从电流表读取电路中的电流值 I，并记入表 2-3 中。

（3）分别以 a、b 为参考点，用电压表测量 a、b、c 三点的电位，并记入表 2-3 中。

（4）用电压表测量电压 U_{ab}、U_{bc}、U_{ca}，并记入表 2-3 中。

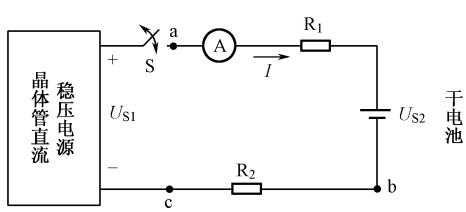


图 2-18　电流、电压和电位的测量实验图

表 2-3　直流电路电流、电压和电位的测量

参考点	测量数据（V）							计算值（V）		
	项目	φ_a	φ_b	φ_c	U_{S1}	U_{S2}	I	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
a	仪表量程									
	仪表指示值									
b	仪表量程									
	仪表指示值									

3．用全电路欧姆定律的方法测量干电池的内电阻

（1）按图 2-19 实验电路正确接线。

（2）改换 2 个不同阻值的电阻，分别测量记录电压（流）表读数，填入表 2-4 中。

（3）根据上面测得的数据，可以用全电路欧姆定律计算出干电池的内电阻。

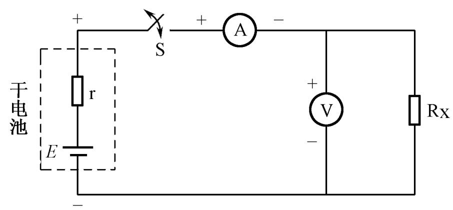


图 2-19　测量干电池的内电阻的实验电路

表 2-4　用全电路欧姆定律测干电池的内电阻

测 量 次 序	1	2	3	4	计算干电池的内电阻 r 和电动势 E	
电阻 R_X 值（Ω）					$I_1=\dfrac{E}{r+R_1}$，$I_2=\dfrac{E}{r+R_2}$ 求解	
电流表读数（A）						
电压表读数（V）						
分　　析					r=	E=

4．用伏安法测定电阻值

（1）按图 2-20 实验电路正确接线。

（2）改变可调直流稳压电源的输出电压，分别测量记录电压（流）表读数，填入表 2-5 中。

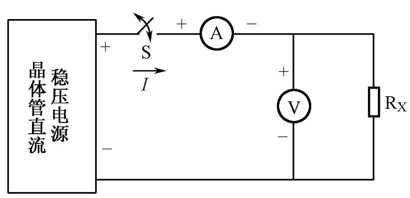


图 2-20　伏安法测定电阻值的实验电路

表 2-5　用伏安法测电阻值

测 量 次 序	1	2	3	4	5	6	7	8
电压表读数（V）								
电流表读数（A）								
计算电阻值（Ω）								
分　　析								

（3）根据表2-5中的电压（流）表读数，用欧姆定律计算出电阻值。
（4）分析电阻值的线性情况，了解误差产生的原因。

2.7.4 注意事项

（1）晶体管稳压电源的内阻很小，在使用时严禁输出端短路。
（2）正确使用直流电压表和直流电流表，要注意它们的极性。
（3）实验电路中使用的电阻，要满足实验对电阻值大小的要求，同时要根据电阻的额定功耗值计算允许通过的电流值，防止电阻因过负荷而烧毁。

2.7.5 创新能力的启发和培养

（1）未知电路中电压（流）的方向时，怎样正确地接入电压（流）表测量？

提示：可以预先对被测电路进行计算确定方向，或者将电压（流）表的一端先接入被测电路，另一端试探性地触及电路，看仪表的指针是否正偏转。

（2）用伏安法测量电阻值时，如何根据被测电阻值大小不同的情况，合适地选择电压（流）表不同的内外接法以减少测量误差？

提示：由于电压（流）表的内阻很大（小），在被测电阻大小不同时，合适地选择电压（流）表不同的内外接法，就能使伏安法测量电阻值更精确些。

2.7.6 思考问题

（1）为什么用指针式直流电压（流）表测量时，要合适地选择量程并尽量使仪表偏转角度达到满量程的三分之二？
（2）仔细观察和分析直流电压（流）表的表盘刻度是否均匀。
（3）为什么说参考点改变后电路中的某两点的电位会改变，而此两点的电压降不变？

2.7.7 实训要求

（1）按照技能训练的目标预习本次实训的内容。
（2）熟悉本次实训所用仪器仪表的使用方法，并记录名称和编号。
（3）按技能训练的步骤测试参数，填入预习报告的表格中。
（4）分析测试数据的准确性，找出误差的原因。
（5）回答思考问题，完成实训报告。

2.8 技能训练4 指针式万用表的正确使用

2.8.1 技能训练目标

（1）学习万用表的使用方法。
（2）学习用万用表测量电阻、电压和电流的方法。

2.8.2 技能训练仪器与器件

（1）直流稳压电源（0～30V）。
（2）交流电源（0～220V）。

（3）万用表（以 MF500 型为例）一块；小功率电阻 5 个；导线若干条。

2.8.3 技能训练内容与步骤

1．认识万用表的面板结构及功能

MF500 型万用表的面板结构主要由表头、表盘、转换开关、机械调零旋钮、欧姆调零旋钮和表笔插孔等组成，如图 2-21 所示。

由图 2-21 可知万用表的测量范围如表 2-6 所示。

表 2-6　MF500 型万用表的测量范围

测 量 项 目	测 量 范 围
直流电压 V̲ （分 5 挡）	0～2.5V；0～10V；0～50V；0～250V；0～500V 和 2500V
交流电压 Ṽ （分 4 挡）	0～10V；0～50V；0～250V；0～500V 和 2500V
直流电流 A（分 5 挡）	0～50μA；0～1mA；0～10mA；0～100mA；0～500mA
电阻Ω（分 5 挡）	R×1；R×10；R×100；R×1k；R×10k
音频电平	−10～＋22dB

2．用万用表电阻挡测量电阻

用万用表电阻挡测量电阻阻值的步骤如下。

1）选挡位、量程

首先将万用表功能开关拨至电阻“Ω”挡位，再将量程开关拨至适当量程。一般以电阻刻度的中间位置接近被测电阻值为宜。

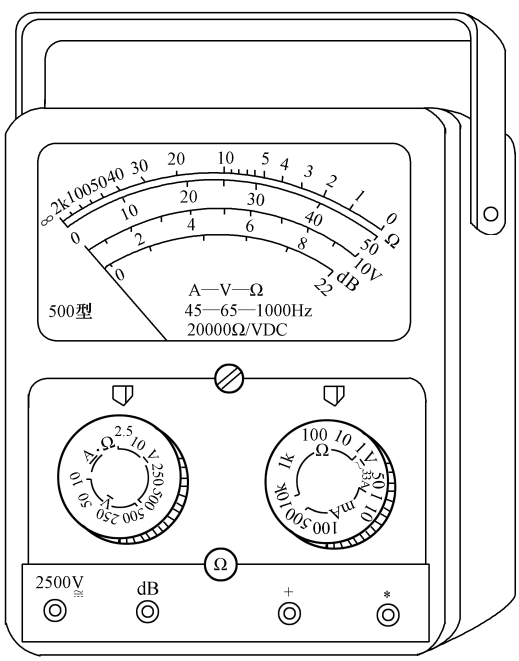


图 2-21　MF500 型万用表表盘

2）电阻调零

将万用表的两表笔短接后，调节面板上的“Ω”调零旋钮，使指针指在 0Ω的位置上。

3）测量电阻值

右手握持两表笔，左手拿住电阻器的一端，将表笔跨接在被测量电阻器的两引线上。

4）读数

将指针在Ω刻度线上的读数与所在电阻挡位对应量程的倍率相乘，即可得到所测电阻值，该值叫实测值或称指示值。例如，指针在Ω刻度线上的读数为 100，量程选择在 R×100，则被测电阻值为 R=100×100=10kΩ。

5）记录数据

将实验所测电阻值记入表 2-7 中。

表 2-7 用万用表电阻挡测量电路（Ω）

R 标称值					
R 测量值					

3．用万用表直流电压挡测量直流电压

（1）万用表直流电压挡的量程有 2.5V、10V、50V、250V、500V 和 2500V 等几挡，测量前应根据被测直流电压值，用万用表的转换开关，选择适当的量程，注意不要用低电压挡位测量高电压值。

（2）用直流稳压电源输出表 2-8 中相应的电压值，将两表笔的正、负端分别与被测电压正、负端并联，读出电压的读数，并记入表 2-8 中。

表 2-8 用万用表直流电压挡测量直流电压（V）

电压值	5	10	15	20	25	30
测量值						

4．用万用表交流电压挡测量交流电压

（1）万用表交流电压挡的量程有 10V、50V、250V、500V 和 2500V 等几挡，测量前应根据被测交流电压值，用万用表的转换开关，选择适当的量程，注意不要用低电压挡位测量高电压值。

（2）将两表笔与被测电压两端子相并联，读出电压的读数，并记入表 2-9 中。

表 2-9 用万用表交流电压挡测量交流电压（V）

电压值	50	60	70	100	120	150	170	200	220
测量值									

5．用伏安法测量电阻

（1）按图 2-22 所示连接实验电路。

（2）将万用表转换开关置于直流电流挡上，选择合适的量程。

（3）测量电流，将读数记入表 2-10 中。

（4）计算电阻，并作伏安特性曲线。

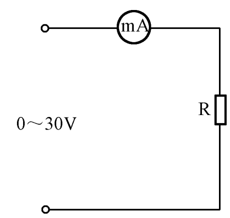


图 2-22 用伏安法测量电阻值

表 2-10　伏安法测电阻

电压值（V）	5	10	15	20	25	30
电流值（mA）						
电阻值（Ω）						

2.8.4 注意事项

1．万用表使用注意事项

（1）使用万用表之前，首先要熟悉各转换开关、旋钮、测量插孔、专用插孔的作用，明确每条刻度线所对应的测量项目。

（2）使用万用表时，分别将两支测量表笔的一端，按红接正（+）、黑接负（−）的要求插到相应的插孔中，然后确认表针是否在 0 位（即指针应与刻度盘左侧的端线对齐）。如果不在 0 位上，可用螺丝刀微调机械调零旋钮使指针处于 0 位处，称之为机械调零。

（3）万用表一般应水平放置，若倾斜放置，应先进行机械调零后再使用。

（4）万用表应在无振动、干燥、无强磁场、环境温度适宜的条件下使用和存放。特别是机械振动的冲击极易损坏万用表，因此要轻拿轻放。

（5）万用表使用完毕，应将“ 功能/量程 ”开关旋至“ · ”位上，或置于交流电压最大量程挡上。

（6）长期不用的万用表应将电池取出。

2．测量电阻注意事项

（1）测电阻时不允许被测电阻带电。

（2）每换一次量程都要重新进行欧姆调零。

（3）电阻挡的刻度线是不均匀的，所以在测量电阻时，应使指针指在刻度尺的 1/3～2/3 间，以保证测量的准确度。

（4）测量电阻时，手不要跨接在被测电阻的两端，以免人体电阻影响测量结果。

3．测量电压（电流）注意事项

（1）在测电流、电压时，不能带电转换量程。

（2）选择量程时，要先选大的，后选小的，尽量使被测值接近于量程。

（3）测直流电压时万用表的“ + ”表笔（红表笔）接到高电位处，“ − ”表笔（黑表笔）接到低电位处，即让电流从“ + ”表笔流入，从“ − ”表笔流出。

（4）测直流电流时必须先断开电路，然后按照电流从“ + ”到“ − ”的方向，将万用表串联到被测电路中，即电流从红表笔流入，从黑表笔流出。

2.8.5 创新能力的启发和培养

怎样用实验的方法验证基尔霍夫定律。

提示：试设计一个含源电路，测试各节点支路的电流，验证 $\Sigma I = 0$ ，测量各回路电压，验证 $\Sigma U = 0$ 。

2.8.6 思考问题

（1）为什么用万用表测量电阻时选择各挡都要预先调零？

（2）为什么万用表电阻挡的刻度是不均匀的？为何测量电阻时选择量程要使指针尽量偏转在中间位置？

（3）从万用表的电路原理理解是怎样测量交流电压的。

2.8.7 实训要求

（1）熟悉本次实训所用仪器仪表的使用方法，并记录名称和编号。

（2）按照技能训练的目标做好本次实训的预习报告。

（3）按技能训练的步骤测试参数，并填入预习报告的表格中。

（4）回答思考问题，完成实训报告。

思考题 2

1. 什么叫电路？电路的基本组成有哪些？
2. 电路的工作状态有哪三种？
3. 怎样理解电阻的串联和并联？总阻值的求解依据是什么？
4. 欧姆定律在无源支路或全电路中的运用有什么差别？
5. 基尔霍夫电流定律为何称为节点定律？而基尔霍夫电压定律为何称为回路定律？

教学微视频

扫一扫

第3章 磁与电磁*

【本章学习目标】

1. 掌握电流产生磁场和磁场中通电导体受电磁力作用的知识，熟练掌握安培定则和左手定则。

2. 理解磁场中 4 个基本物理量的意义，并熟记它们的单位和符号。

3. 掌握右手定则、楞次定律和法拉第电磁感应定律，并能定性分析各种常见的电磁感应现象。

4. 了解铁磁材料的磁性能、分类和用途。

5. 掌握电磁铁、自感的基本知识。

本章为课程选修内容，如需阅读详细内容请扫描以下二维码。

扫一扫

说明：本章内容约有 11 页，如需该章内容的纸质文稿，请通过电子邮箱 puyue@phei.com.cn 联系我们，并请将书名、章节名，以及您个人的联系方式（姓名、地址、电话）发送到该邮箱，我们将为您提供有偿打印寄送服务，每份文稿资料将收取 8 元打印邮寄服务费。

第 4 章　电容与电感

【本章学习目标】

1. 了解电容器的概念及其作用。
2. 了解电感的概念。
3. 理解电容的概念，能分析有关电容问题并进行简单的计算。
4. 理解电感线圈的用途和选用。
5. 掌握电感和电容的识别与检测。

【教学目标】

1. 知识目标：能够识别不同类型的电容器和电感器，并能判断它们的好坏。
2. 能力目标：结合实际，提高学生综合运用知识的能力。

【教学重点】

不同类型电容和电感的识别；电容和电感好坏的判断。

【教学难点】

电容器串、并联的计算。

【教学方法】

讲授法、探究法、分析法、练习法。

4.1　电容器

在很多电子产品中，电容器都是必不可少的电子元器件，它是一种储能元器件，在电路中用于调谐、滤波、耦合、旁路、能量转换和延时等。

4.1.1　电容器与电容量

1．电容器

电容器就是储存电荷的容器。在两个导体之间隔以绝缘物即可构成一个电容器。这两个导体称为电容器的极板，而中间的绝缘物称为介质。电容器的图形符号为“⊣⊢”，文字符号为“C”。

2．电容量

为了衡量电容器储存电荷本领的大小，引入电容量这一物理量，其定义为：电容器任一极板上所储存的电荷量 Q 与两极板间电压 U 的比值，称为电容器的电容量，用符号 C 表示。即

$$C=\frac{Q}{U} \tag{4-1}$$

式中　Q——任一极板上的电荷量（C）；

　　　U——两极板间的电压（V）；

　　　C——电容量（F）。

在实际使用中，一般电容器的电容量都比较小，因此常用比较小的单位，如微法（μF）、纳法（nF）和皮法（pF）。它们之间的换算关系为

$$1\mu F = 10^{-6}F$$
$$1nF = 10^{-9}F$$
$$1pF = 10^{-12}F$$

使电容器带电的过程称为充电，使电容器失去电荷的过程称为放电。

电容器和电容量通常都被称为电容，但两者的意义不同。前者表示元器件的名称，后者表示物理量的名称。电容器制造好以后，电容量就是一个定值。但不只是成品电容器中才有电容量，实际上任何两个彼此绝缘而又互相靠近的导体之间都存在有一定的电容量。

4.1.2 电容器的种类和额定值

1．电容器的种类

电容器的种类有很多，从原理上可以分为：无极性可变电容、无极性固定电容、有极性电容等；从材料上可以分为：CBB 电容（聚乙烯）、涤纶电容、瓷片电容、云母电容、独石电容、电解电容、钽电容等；从容量是否可调可以分为：固定电容器、可变电容器、微调电容器等。常用的几种电容器如图 4-1 所示。

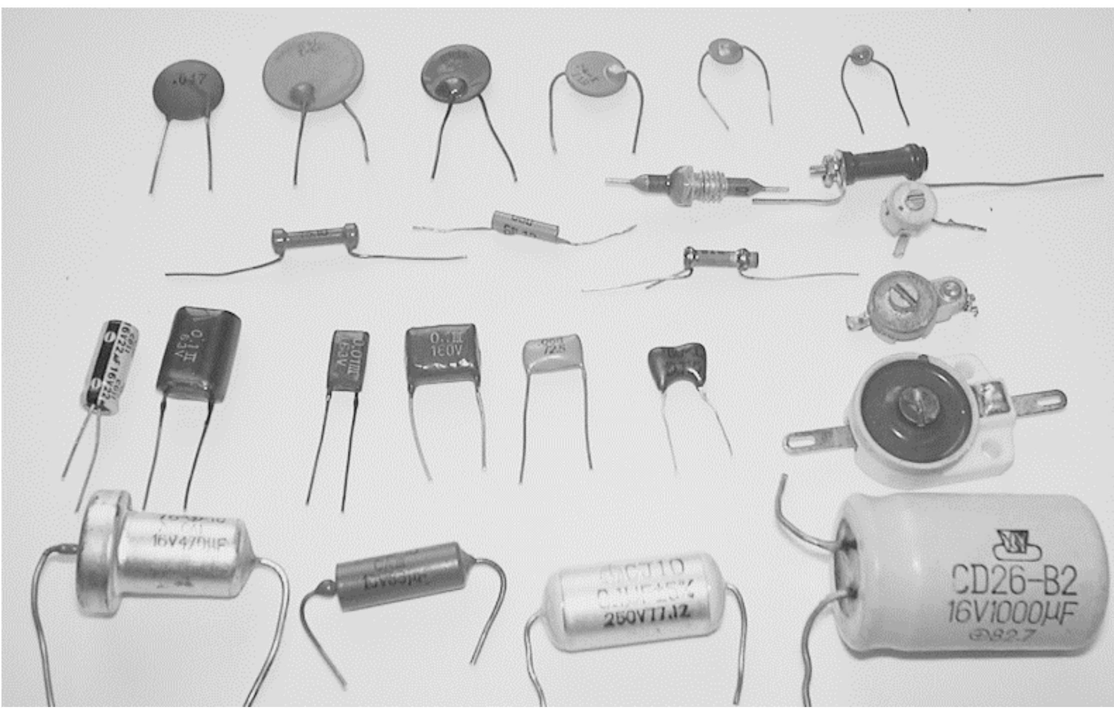


图 4-1　常用的几种电容器

2．电容器的主要性能指标

电容器的性能指标有标称容量、允许误差、额定工作电压、介质损耗和稳定性等。其中最

主要的指标是电容量、允许误差和额定工作电压，一般都直接标在成品电容器的外壳上，常称为电容器的标称值。它是人们合理使用电容器的依据。

1）额定工作电压

电容器的工作电压习惯称为“耐压值”，它是指电容器在线路中能够长期安全工作所能承受的最高直流电压。如果在交流电路中，要注意所加的交流电压最大值不能超过电容的直流工作电压值。电容器常用的耐压值有 4.3V、10V、16V、25V。

2）标称容量和允许误差

为了生产和选用的方便，国家规定了各种电容器的电容量的一系列标准值，称为标称容量，也就是在电容器上所标出的容量。

实际生产的电容器的电容量和标称的电容量之间总是会有误差的。根据不同的允许误差范围，规定电容器的精度等级。电容器的电容量允许误差等级为 5 个等级：00 级表示允许误差为±1%；0 级表示允许误差为±2%；Ⅰ级表示允许误差为±5%；Ⅱ级表示允许误差为±10%；Ⅲ级表示允许误差为±20%。

3．电容器的识别与检测

1）电容器的识别

直标法：在电容器体上直接标出容量、单位、允许偏差，如 470μF。

文字符号法：用文字符号与数字有规律的组合来表示容量。如 6p8 表示 6.8pF，4μ7 表示 4.7μF，1n 表示 1000pF，104 表示 100000pF 即 0.1μF。

色标法：用色环或色点表示容量，一般以皮法（pF）为单位，与电阻色环规则相同。

2）电容器的检测

固定电容器（10pF 以下的小电容）的检测：因 10pF 以下的固定电容器容量太小，用万用表进行测量，只能定性地检查其是否有漏电、内部短路或击穿现象。测量时，可选用万用表 R×10k 挡，用两表笔分别任意接电容的两个引脚，阻值应为无穷大。若测出阻值（指针向右摆动）为零，则说明电容漏电损坏或内部击穿。

固定电容器（大于 10pF）的检测：用万用表的 R×10k 挡检测其是否有充电现象，根据充电现象判断电容器有无内部短路或漏电，并可根据指针向右摆动的幅度大小估计出电容器的容量。

电解电容器的检测：将万用表红表笔接负极，黑表笔接正极（1～47μF 间的电容，可用 R×1k 挡测量，大于 47μF 的电容可用 R×100 挡测量），在刚接触的瞬间，万用表指针即向右偏转较大偏度（对于同一电阻挡，容量越大，摆幅越大），接着逐渐向左回转，直到停在某一位置。此时的阻值便是电解电容的正向漏电阻，此值略大于反向漏电阻。实际使用经验表明，电解电容的漏电阻一般应在几百 kΩ 以上，否则，将不能正常工作。在测试中，若正向、反向均无充电的现象，即表针不动，则说明容量消失或内部断路；如果所测阻值很小或为零，说明电容漏电大或已击穿损坏，不能再使用。对于正、负极标志不明的电解电容器，可利用上述测量漏电阻的方法加以判别。即先任意测一下漏电阻，记住其大小，然后交换表笔再测出一个阻值。两次测量中阻值大的那一次便是正向接法，即黑表笔接的是正极，红表笔接的是负极。

4．电容器的选用

在实际选用电容器时，应考虑以下几个方面的问题。

（1）电容器在电路中实际要承受的电压不能超过它的耐压值。在滤波电路中，电容器的耐

压值不要小于交流有效值的 1.42 倍。使用电解电容时，还要注意正、负极不要接反。

（2）不同电路应该选用不同种类的电容器。谐振回路可以选用云母、高频陶瓷电容器；隔直流可以选用纸介、涤纶、云母、电解、陶瓷等电容器；滤波可以选用电解电容；旁路可以选用涤纶、纸介、陶瓷、电解等电容器。

（3）电容器在装入电路前要检查它有没有短路、断路和漏电等现象，并且核对它的电容值。安装的时候，要使电容器的类别、容量、耐压等符号容易看到，以便核实。

4.1.3 电容器的串联和并联*

实际工作中经常遇到几只电容器串、并联的情况，这时与电阻一样均可将其等效为一个电容器。

1．电容器的串联

将几只电容器依次连接，构成中间无分支的连接方式，称为电容器的串联，如图 4-2 给出了三只电容器串联的电路。其特点如下：

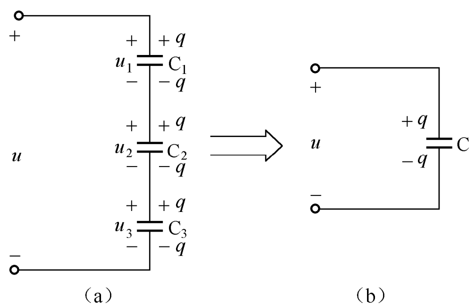


图 4-2　电容器串联电路

（1）电容器串联时，各电容器上所带的电荷量相等，即

$$q_1 = q_2 = q_3 = \cdots = q_n = q \tag{4-2}$$

（2）电容器串联时，电路两端的总电压等于各电容器两端的电压之和，即

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + \cdots + u_n \tag{4-3}$$

（3）电容器串联时，电路的总电容量（即等效电容）的倒数，等于各串联电容器电容量的倒数之和，即

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n} \tag{4-4}$$

由上可知：电容器串联时的等效电容减小了，若串联个数越多，等效电容量则越小。电容器串联使用时，每一只电容器实际承受的电压是不同的，由 $C = \frac{q}{U}$ 可得，电容器容量越大，其两端实际承受的电压就越小。使用时应注意。

2．电容器的并联

将两只或两只以上的电容器连接在电路中相同的两点之间的连接方式，称为电容器的并联。如图 4-3 所示为三只电容器的并联电路。其特点有如下几点。

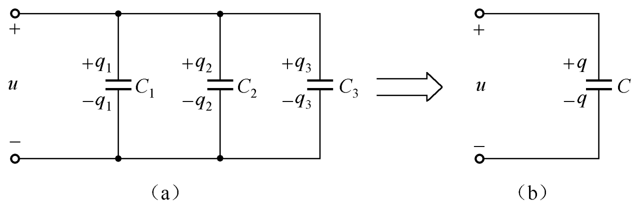


图 4-3　电容器串联电路

（1）电容器并联时，每只电容器两端所承受的电压相同，并等于电源电压，即

$$u_1 = u_2 = u_3 = \cdots = u_n = u \tag{4-5}$$

（2）电容器并联时，电路的总电容量（即等效电容量）等于各电容器的电容量之和，即

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n \tag{4-6}$$

（3）电容器并联时，等效电容器所储存的电荷量等于各电容器所储存的电荷量之和，即

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \cdots + q_n \tag{4-7}$$

由上可知：电容器并联时的等效电容增大了，若并联个数越多，等效电容量则越大。电容器并联使用时，每一只电容器实际承受的电压是相同的。

4.2　电感

电感线圈是一种储能元器件，它能把电能转换成磁场能。它和电阻器、电容器一样，都是电子设备中的重要组成元器件。

4.2.1　电感线圈与电感元器件

第 3 章介绍过在任何导线或线圈中流过电流时，其周围都会产生磁场，线圈中的电流发生变化时，线圈周围的磁场也做相应的变动，变动的磁场可使线圈自身产生电动势，这就是自感作用。电感就是用来表示自感应特性的一个物理量。凡是能够产生自感作用的元器件，统称为电感器。通常电感器都是由线圈构成的，因此也称为电感线圈。

电感线圈是用漆包线或纱包线或裸导线一圈靠一圈地绕在绝缘管上或铁芯上而又彼此绝缘的一种元器件。电感线圈简称线圈，其图形符号为“ ”，文字符号为“L”。

电感器的种类很多，通常按电感的形式分为固定电感受器、可变电感器和微调电感器；按磁体性质分为空心线圈、磁芯线圈和铜芯线圈；按结构特点分为单层线圈、多层线圈和蜂房线圈。常用的几种电感器如图 4-4 所示。

4.2.2　电感线圈的用途和选用

电感线圈的用途很广，例如，发电动机、电动机、变压器、电抗器和继电器等电气设备中的绕组就是各种各样的电感线圈；另外，收音机、电视机等电子产品中也有不少电感线圈，如：振荡线圈、天线线圈、中频变压器（中周）和贴片式电感线圈等。

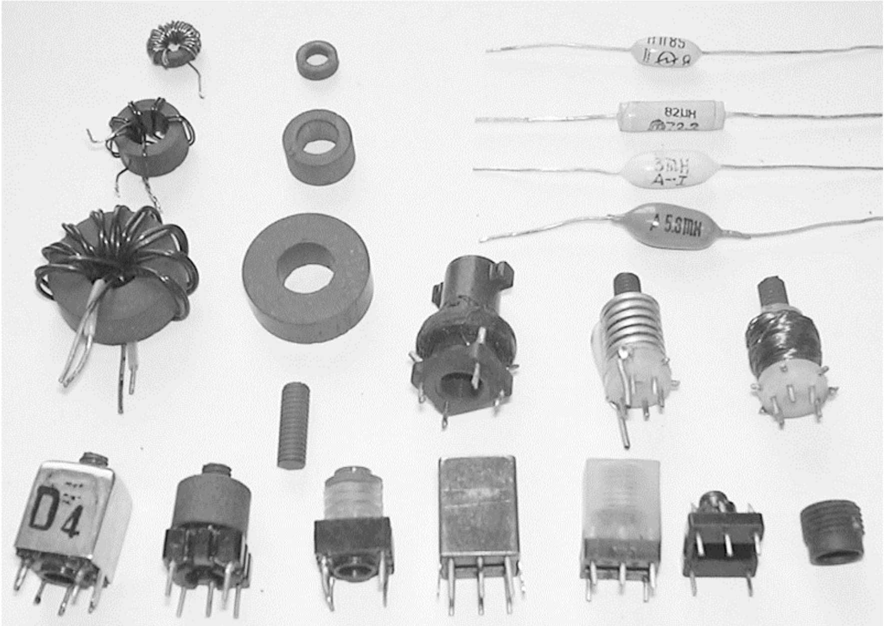


图 4-4　常用的几种电感器

选用电感线圈时，要注意额定值，即额定电感量和额定电流。线圈中实际通过的电流不能大于其额定值，否则会使线圈过热或承受很大的电磁力，导致机械变形，甚至烧毁。

此外，在使用线圈时，应注意不要随便改变线圈的形状、大小和线圈间的距离，否则会影响线圈原来的电感量。尤其是频率越高，即圈数越少的线圈。所以目前在电视接收机中采用的高频线圈，一般用高频蜡或其他介质材料进行密封固定。

电感线圈好坏的检测可用万用表中合适的欧姆挡通过检测线圈的直流电阻并与正常值比较来判断。如果实测阻值较大甚至无穷大，可知线圈断路；若实测阻值远小于应有值，则线圈内部严重短路，但多数情况下线圈局部短路靠万用表是测不出来的。对于匝数较少的线圈，其直流阻值近似为零，可以用万用表 R×1 挡测其阻值并与两表笔直接短路时的情况仔细比较区别来判断线圈是否短路。

4.3　技能训练 5　电阻、电感和电容的识别与检测

4.3.1　技能训练目标

（1）学习识别电阻阻值和功耗的方法。
（2）了解测量电阻的方法。
（3）学习识别电容器的方法。
（4）了解测量电感的方法。

4.3.2　技能训练仪器与器件

（1）指针式万用表。
（2）单臂电桥。
（3）各种电阻、电感和电容。

4.3.3 技能训练内容与步骤

1．学习识别电阻阻值和功耗的方法

电阻的种类较多，如图 4-5 所示为部分电阻器的外形。色环标识法一般用于圆柱形的电阻器上，如碳膜电阻、金属膜电阻、金属氧化膜电阻、保险丝电阻、线绕电阻。当电阻的表面不足以用数字表示时，可采用色环标识法来表示电阻的阻值、公差、规格。色环分为两部分，第一部分是靠近电阻前端的一组色环，用于表示阻值。有 2 位有效数字的电阻值，用 3 个色环表示，如 39Ω、39kΩ、39MΩ。有 3 位有效数字的电阻值，用 4 个色环表示，如 69.8Ω、698Ω、69.8kΩ，一般用于精密电阻的表示。第二部分是靠近电阻后端的一条色环，用于表示公差精度。

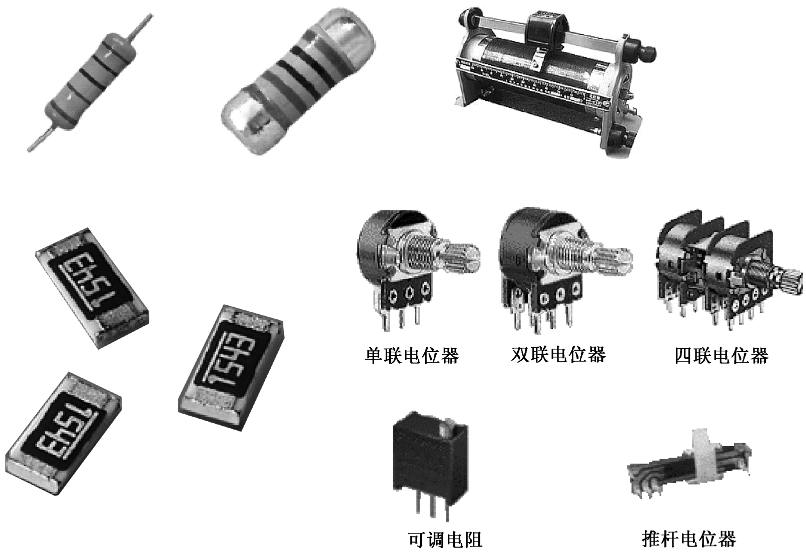


图 4-5　部分电阻器的外形

第一部分的每一条色环都是等距，自成一组，容易和第二部分的色环区分。四色环电阻的识别：第一、二环分别代表阻值的 2 位有效数字；第三环代表倍率；第四环代表误差。五色环电阻的识别：第一、二、三环分别代表阻值的 3 位有效数字；第四环代表倍率；第五环代表误差。如果第五条色环为黑色，一般表示此为线绕电阻器，如为白色，表示阻值的为保险丝电阻器。如果电阻体上只在中间有一条黑色的色环，则代表此电阻为零欧姆电阻。色环电阻的颜色对照表见表 4-1。

表 4-1　色环电阻的颜色对照表

	银	金	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	无
有效数字	—	—	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	—
数量级	10^{-2}	10^{-1}	10^{0}	10^{-1}	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}	10^{6}	10^{7}	10^{8}	10^{9}	—
允许偏差（%）	±10	±5	—	±1	±2	—	—	±0.5	±0.25	±0.1	—	+50 −20	±20

电阻的测量在电工电子测量中占有十分重要的地位，如测量线路的通断，判断电气设备和线路的故障所在，测量电阻阻值的变化等。工程中所测量的电阻值范围一般在 10^{-6}～10^{12}Ω。

实际中为了选择合适的测量电阻的方法，减小测量误差，通常可将电阻按其阻值大小分为三类：1Ω以下为小电阻，1Ω～100kΩ为中电阻，100kΩ以上为大电阻。电阻器的符号如图 4-6 所示。

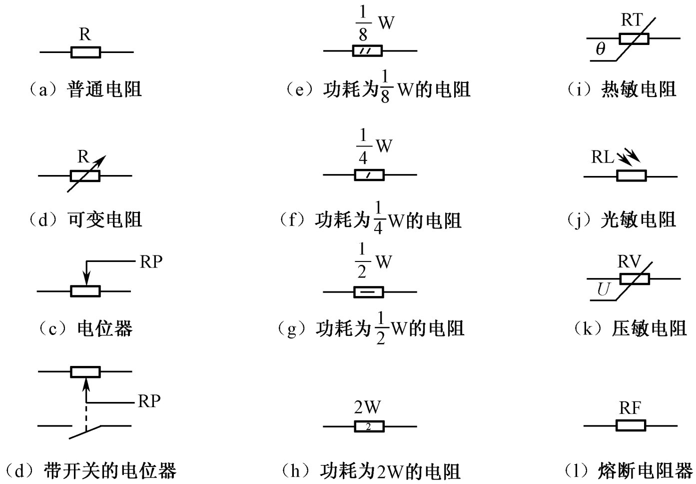


图 4-6　各种电阻器的符号图

测量电阻的方法较多，常用的有以下方法。

（1）直接法——采用只读式仪表测量电阻的方法。如用万用表测量电阻，兆欧表测量电阻等。

（2）比较法——采用比较仪表测量电阻的方法。如用直流电桥测量电阻。

（3）间接法——先测量与电阻有关的量，然后通过相关公式计算出被测电阻的方法。例如用伏安法测量电阻就属于典型的间接法。

用不同仪器仪表测量电阻的方法及其优、缺点见表 4-2。

表 4-2　用不同仪器仪表测量电阻的方法的比较

序号	测量方法	适用范围	优　　点	缺　　点
1	万用表法	中电阻	直接读数，使用方便	测量误差较大
2	伏安法	中电阻	能测量工作状态下元器件的电阻值，尤其适用于对非线性元器件（二极管）电阻的测量	测量误差较大 测量结果需计算
3	兆欧表法	大电阻	直接读数，使用方便	测量误差较大
4	单臂电桥法	中电阻	精确度高	操作麻烦
5	双臂电桥法	小电阻	精确度高	操作麻烦
6	接地摇表法	接地电阻	精确度较高，尤其适用于测量接地电阻	操作麻烦

在使用电阻时，识别电阻的允许功率也是很重要的。由于电阻值的功率 $P = I^2 R$，所以可知允许通过电阻的最大电流为 $I = \sqrt{P/R}$。若工作中超过此电流值，电阻器就容易发热甚至烧坏。

一般而言，在同样阻值的情况下，外观体积越大的电阻，允许功率越大。常用电阻的允许功率是 1/4W 和 1/2W，底色是蓝色的，同样阻值时，1/4W 电阻比 1/2W 电阻的体积小。大于 1W 的电阻，底色是灰色的，上面都有功率的标识。

2．电容器

电容器是电子设备中常用的电子元器件，下面对几种常用电容器的结构和特点做简要

介绍。

（1）铝电解电容器：它由铝圆筒做负极、里面装有液体电解质，插入一片弯曲的铝带做正极制成。此外还需经直流电压处理，在正极片上形成一层氧化膜做介质。其特点是容量大、但是漏电大、稳定性差、有正负极性，适用于电源滤波或低频电路，使用时正、负极不能接反。

（2）钽铌电解电容器：它用金属钽或者铌做正极，用稀硫酸等配液做负极，用钽或铌表面生成的氧化膜做介质制成。其特点是体积小、容量大、性能稳定、寿命长、绝缘电阻大、温度性能好，用在要求较高的设备中。

（3）陶瓷电容器：用陶瓷做介质。在陶瓷基体两面喷涂银层，然后烧成银质薄膜做极板制成。其特点是体积小、耐热性好、损耗小、绝缘电阻高，但容量小，适用于高频电路。铁电陶瓷电容容量较大，但损耗和温度系数也较大，适用于低频电路。

（4）云母电容器：用金属箔或在云母片上喷涂银层做电极板，极板和云母一层一层叠合后，再压铸在胶木粉或封固在环氧树脂中制成。其特点是介质损耗小、绝缘电阻大、温度系数小，适用于高频电路。

（5）薄膜电容器：结构与纸介电容器相同，介质是涤纶或聚苯乙烯。涤纶薄膜电容，介质常数较高，体积小、容量大、稳定性较好，适宜做旁路电容。聚苯乙烯薄膜电容器，介质损耗小、绝缘电阻高，但温度系数大，可用于高频电路。

（6）纸介电容器：用两片金属箔做电极，夹在极薄的电容纸中，卷成圆柱形或者扁柱形芯，然后密封在金属壳或者绝缘材料壳中制成。它的特点是体积较小，容量可以做得较大，但是固有电感和损耗比较大，适用于低频电路。

（7）金属化纸介电容器：结构基本与纸介电容器相同，它是在电容器纸上覆上一层金属膜来代替金属箔，体积小、容量较大，一般用于低频电路。

（8）油浸纸介电容器：它是把纸介电容浸在经过特别处理的油里，能增强其耐压性能。其特点是电容量大、耐压高，但体积较大。此外，在实际应用中，第一要根据不同的用途选择不同类型的电容器；第二要考虑到电容器的标称容量，允许误差、耐压值、漏电电阻等技术参数；第三对于有正、负极性的电解电容器来说，正、负极在焊接时不能接反。

★ 用万用表电阻挡测量小电容值的电容器

可按图 4-7（a）或图 4-7（b）所示连接电路。图 4-7（a）使用的是两只 PNP 型的晶体管，如 9012、9015、3CG 等小功率管，β 值应大于 100。图 4-7（b）使用的是两只 NPN 型的晶体管，如 9013、9014、3DG 等小功率管，每只晶体管的β 值应大于 100。

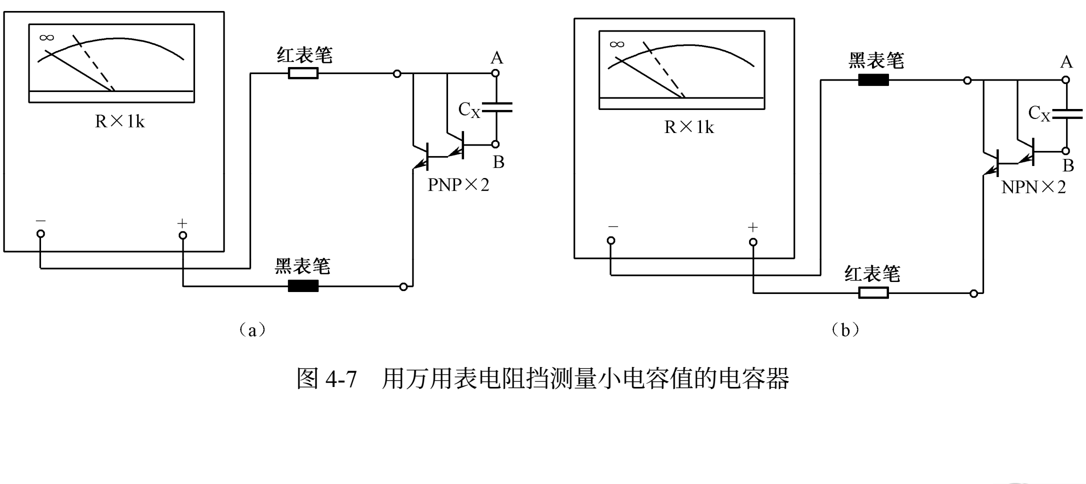


图 4-7　用万用表电阻挡测量小电容值的电容器

这种测试小容量电容器的原理是：由于复合管的放大倍数非常高，当电容器 C_X 插入 A、B 端的瞬间，其充电过程会使晶体管集电极产生较大的集电极电流，使表针产生较大幅度的摆动。被测电容越大，表针摆动幅度越大，因此可以通过表针摆动的大小粗略判断出小容量电容器的电容值。一般情况下当万用表拨在 R×1k 挡时测量 10pF 以上的小容量电容器是没有问题的。如果想测量容量小于 10pF 的电容器同时看清表针的摆动，可把万用表拨至 R×10k 挡。

★ 测量电容器漏电的大小

电容器的漏电越小，其性能也越好。电容器漏电的大小可用万用表电阻挡来测量，方法是用万用表最高电阻挡（一般为 R×10k 挡），用两根表笔分别接触电容器的两根引线（注意不能用手并接在电容器两端），此时万用表指针先向右（R=0 的方向）摆动一下，然后逐步复原至 R=∞的方向。如果回不到“∞”，则表针所指的数值，就是漏电电阻。一般固定电容（除电解电容器外）的漏电电阻是极大的（几十到几百兆欧）。若小于 12MΩ，就是质量差的电容器。电解电容器的漏电电阻要比固定电容器的漏电电阻小得多，但也必须在规定的阻值以上。

★ 用万用表测量电容器电容的大小

对于 5000pF 以上大容量的电容器可以用万用表电阻挡估测电容器的电容值。方法是先把被测电容器的两根引线短路（让电容器完全放电），然后用万用表黑表笔接电解电容器的正极（如果是无极性电容器可不分正负），红表笔接电解电容器的负极，此时表针向右快速摆动（一定要看清表针向右摆动的最大数值），然后又向左停在∞处。根据表针向右摆动的最大数值就可以估测出电容器电容的大小。表 4-3 给出了用 MF47 型万用表测量电容器电容的数据，以供参考。

如果第一次测量时没有看清表针向右摆动的最大值，可把电容器两根引线短路，再按上述方法进行测量，直到看清为止。

表 4-3　电容量与万用表表针偏转指示值对应关系

<table>
<tr><th>万用表挡位</th><th>表针指示值</th><th>固定电容器（μF）</th><th>万用表挡位</th><th>表针指示值</th><th>电解电容器（μF）</th></tr>
<tr><td rowspan="14">×10k</td><td>1k</td><td>0.01</td><td>×10k</td><td>70</td><td>0.22</td></tr>
<tr><td>400</td><td>0.022</td><td rowspan="8">×1k</td><td>120</td><td>1.0</td></tr>
<tr><td>300</td><td>0.033</td><td>100</td><td>2.2</td></tr>
<tr><td>250</td><td>0.047</td><td>70</td><td>3.3</td></tr>
<tr><td>220</td><td>0.056</td><td>34</td><td>4.7</td></tr>
<tr><td>200</td><td>0.068</td><td>26</td><td>10</td></tr>
<tr><td>190</td><td>0.082</td><td>13</td><td>22</td></tr>
<tr><td>170</td><td>0.1</td><td>11</td><td>33</td></tr>
<tr><td>130</td><td>0.15</td><td>7</td><td>47</td></tr>
<tr><td>80</td><td>0.22</td><td rowspan="4">×100</td><td>22</td><td>100</td></tr>
<tr><td>70</td><td>0.33</td><td>10</td><td>220</td></tr>
<tr><td>55</td><td>0.47</td><td>9</td><td>330</td></tr>
<tr><td>42</td><td>0.68</td><td>7</td><td>470</td></tr>
<tr><td>32</td><td>0.82</td><td rowspan="2">×10</td><td>30</td><td>1000</td></tr>
<tr><td rowspan="2">×1k</td><td>180</td><td>1.0</td><td>18</td><td>2200</td></tr>
<tr><td>140</td><td>1.5</td><td>×1</td><td>70</td><td>330</td></tr>
</table>

3．电感器

测量电感器的方法有很多种，最简单的办法如下。

（1）用欧姆表测量出电感器的直流电阻 R。再给电感器施加一个交流电流，测量出端压 U 和电流 I，用 U 和 I 的比值计算出电感器的阻抗 Z，然后计算出电感量

$$L=\sqrt{Z^2-R^2}/2\pi f$$

（2）振荡法。

用已知电容与待测电感接成振荡电路测量频率，或用已知电感与待测电容接成振荡电路测量频率。用一个已知周期的振荡器产生高频脉冲，频率要远高于振荡电路的频率，然后数出振荡电路振荡波一个周期中高频脉冲的个数，就可以知道振荡电路的频率。

此外，还有采用量具比对法的交流电桥、利用谐振原理的 Q 表、利用阻抗原理和矢量法的数字电感测试仪、利用衰减振荡计数法的数字电感测试仪、采用谐振替代法的电感电容测试仪、采用充电计数法的数字仪表等测量方法。

4.3.4 注意事项

（1）注意掌握正确测量电阻的方法。

（2）用较高的电压测量电容器后，注意给电容器放电，以免遭到电击。

（3）了解单臂电桥的正确使用方法。

（4）若采用其他仪器仪表时，要首先学习其使用方法。

4.3.5 创新能力的启发和培养

（1）怎样充磁和消磁？

提示：给一个普通铁件充磁要注意直流充磁电流的大小和方向，可以试验用不同的充磁电流获得不同的吸力；而消磁必须有从大变化到小的正弦电流，反复进行几次才能退净余磁。

（2）怎样设计电感量？

提示：可以通过空心或铁芯线圈的截面大小和线绕匝数调节，试验测量电感量的变化程度。

4.3.6 思考问题

（1）电阻器的识别和测量要注意哪些问题？

（2）电容器测量前后为什么要短接两个引线端？

（3）电感器电感量的大小与什么因素有关？

4.3.7 实训要求

（1）记录几个色标电阻的计算方法，并与测量值相比较后，分析误差原因。

（2）试测量几个不同的电容器，与表 4-3 中的数据比较。

（3）测量并计算电感值时首先要比较准确地测量线圈的直流电阻值，记录数据并进行比较。

（4）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 4

1．一只电容器的电容量为 $1.5\times10^{-4}\mu F$，接在电压为 100V 的直流电源上，问：该电容器储存的电荷量是多少？

2．电容器和电容量的区别是什么？

3．电容器的主要指标有哪些？

4．在实际选用电容器时，应考虑哪些方面的问题？

5．现有两只电容器，其中一只电容为 0.25μF，耐压值为 250V，另一只电容为 0.5μF，耐压值为 500V，试求：

（1）它们串联以后的等效电容及总耐压值是多少？

（2）它们并联以后的等效电容及总耐压值是多少？

6．电感线圈在使用时应注意什么？

7．用万用表如何判断电感线圈的好坏？

教学微视频

扫一扫

第 5 章　单相正弦交流电路

【本章学习目标】

1. 了解正弦交流电的产生原理。

2. 了解正弦交流电的周期、频率、角频率、最大值、有效值、初相位、相位差等特征量，掌握正弦交流电的三要素。

3. 理解正弦交流电的解析式、波形图、相量图三种表示方法。

4. 掌握交流电路中电阻、电感、电容等元器件的电压与电流之间的数量关系和相位关系，以及感抗、容抗的计算。

5. 掌握 RL 串联电路端电压与电流之间的关系，以及电压三角形、阻抗三角形和功率三角形等概念。

6. 掌握正弦交流电路的有功功率、无功功率、视在功率、功率因数的计算。

7. 了解提高功率因数的意义和方法。

8. 掌握 RLC 串联电路的分析方法，理解串联谐振的条件、谐振频率和特征。

【教学目标】

1. 知识目标：能正确描述正弦交流电的基本概念和基本关系。

2. 能力目标：在理论学习的基础上，通过综合实训提高电工技术的应用能力。

【教学重点】

正弦交流电的三要素以及三种表示方法，单一参数正弦交流电路中电压、电流大小及相位之间的关系。

【教学难点】

相位差以及无功功率的概念。

【教学方法】

讨论法、实验法、演示法、探究法。

在第 2 章中所讲的电量，都是大小和方向不随时间变化的，我们称之为稳恒直流电。本章介绍的单相正弦交流电，其电量的大小和方向均随时间按正弦规律进行周期性变化，是交流电中的一种。电量随不随时间变化是交流电与直流电之间的本质区别。

在日常生产和生活中，广泛使用的都是本章所介绍的正弦交流电，这是因为正弦交流电在传输、变换和控制上有着直流电不可替代的优点。单相正弦交流电路的基本知识则是分析和计算正弦交流电路的基础，因此了解和掌握正弦交流电的特点，必须学会正弦交流电路的基本分析方法。下面首先介绍正弦交流电路的基本概念。

5.1　正弦交流电路的基本概念

5.1.1　正弦交流电动势的产生

大多数正弦交流电动势是由交流发电动机产生的。如图 5-1（a）所示为交流发电动机电流

产生的示意图，它由一对正对的磁极与转子线圈组成，在外力作用下使转子线圈在磁场中匀速转动。观察电流表的指针发现，指针随着线圈的转动而摆动，并且线圈每旋转一周，指针左右摆动一次。这表明转动的线圈里产生了感应电流，并且感应电流的大小和方向都在随时间做周期性的变化。这种大小和方向均随时间做周期性变化的电流称为交流电。

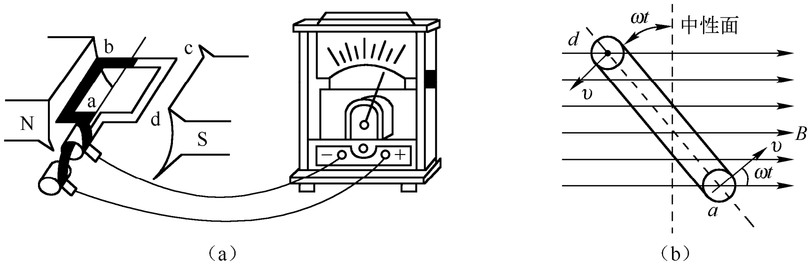


图 5-1　交流发电动机电流产生示意图

交流发电动机中的转子线圈在匀强磁场中沿逆时针方向匀速转动，如图 5-1（b）所示，假定线圈平面从与磁感线垂直的平面（这个面称为中性面）开始计时，线圈转动的角速度为 ω，单位为 rad/s，经过时间 t 以后，线圈转过的角度为 ωt，此时 ab 边线速度的方向与磁感线方向的夹角也等于 ωt。设矩形线圈 ab 边的长度为 L 磁场的磁感应强度为 B，由于 cd 边也有感应电动势且与 ab 中的感应电动势串联，故这一瞬间整个线圈中的感应电动势 e 可用下式表示：

$$e=2BL\upsilon\sin\omega t \tag{5-1}$$

令 $E_m=2BL\upsilon$，如果 $t=0$ 时，线圈平面与中性面的夹角为 φ_0，则有

$$e=E_m\sin(\omega t+\varphi_0) \tag{5-2}$$

这种按正弦规律变化的交流电叫正弦交流电，简称交流电，它是一种最简单而又最基本的交流电。

由上可知：交流发电动机产生的电动势是按正弦规律变化的，它可以向外电路输送正弦交流电。

5.1.2 正弦交流电的三要素

为了准确地描述交流电，引入以下几个物理量。

1．瞬时值、最大值和有效值

1）瞬时值

交流电在某一时刻的值称为瞬时值。瞬时值用小写字母表示，如 u、i、e 分别表示电压、电流、电动势的瞬时值。

2）最大值

瞬时值中最大的值称为最大值，也称为幅值、峰值或振幅。最大值用大写字母加下标 m 表示，如 U_m、I_m、E_m 分别表示电压、电流、电动势的最大值。

3）有效值

正弦交流电的最大值和瞬时值都不能正确反映它的做功能力，因此引入有效值的概念。交流电的有效值是根据电流的热效应来规定的，让交流电与直流电同时分别通过两个相同阻值的电阻器，如果它们在同样的时间内产生的热量相等，那么这个交流电流的有效值在数值上就等

于这个直流电流的大小。有效值用大写字母表示，如 U、I、E 分别表示电压、电流、电动势的有效值。

根据定义，通过计算表明，正弦交流电的有效值与最大值之间有如下关系：

$$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}\approx 0.707\ U_m \tag{5-3}$$

$$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}\approx 0.707\ I_m \tag{5-4}$$

$$E=\frac{E_m}{\sqrt{2}}\approx 0.707\ E_m \tag{5-5}$$

注意：交流电的有效值是非常重要的概念。今后无特殊说明，交流电的大小总是指有效值。交流电表测出的值就是交流电的有效值。用电器上标明的额定值等都是指有效值。但用电器上说明的耐压值是指最大值。

2．周期、频率和角频率

周期、频率和角频率都是反映交流电变化快慢的物理量。

1）周期

交流电完成一次周期性变化所需的时间叫周期。用符号 T 表示，单位为 s。比 s 小的常用单位还有 ms、μs 和 ns。它们之间的换算关系为

$$1\text{s}=10^3\text{ms}=10^6\mu\text{s}=10^9\text{ns}$$

周期越小，说明交流电变化一次所用的时间越短，交流电变化得越快。

2）频率

交流电在 1s 内完成周期性变化的次数叫频率。用符号 f 表示，单位为 Hz。常用的单位还有 kHz 和 MHz。它们之间的换算关系为

$$1\text{Hz}=10^{-3}\text{kHz}=10^{-6}\text{MHz}$$

根据周期和频率的定义可知，周期和频率互为倒数，即

$$f=\frac{1}{T} \tag{5-6}$$

我国和世界上大多数国家工农业生产和生活所用的交流电频率都是 50Hz，称为工频交流电；日本、德国等少数国家采用的交流电频率为 60Hz。

3）角频率

交流电每秒内变化的电角度称为角频率。用符号 ω 表示，单位为 rad/s。

根据角频率的定义有

$$\omega=2\pi f=\frac{2\pi}{T} \tag{5-7}$$

3．相位和相位差

1）相位

交流电在 t 时刻线圈平面与中性面的夹角称为该正弦交流电的相位或相位角，用符号 $\omega t+\varphi_0$（或 α 表示）表示。

$t=0$ 时的相位称为初相位或初相角，用符号 φ_0 表示。它反映了正弦交流电起始时刻的状

态。交流电的初相可以为正，也可以为负或零。初相一般用弧度表示，也可用角度表示。为了避免混乱，规定初相角的取值为$-\pi \leq \varphi_0 \leq \pi$（或$-180° \leq \varphi_0 \leq 180°$）。

2）相位差

电工技术中常用相位差来比较两个交流电变化进程的先后，实质上也反映了时间差。相位差是指两个同频率交流电的相位之差，用 $\Delta\varphi$ 表示。即

$$\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1 \tag{5-8}$$

因为频率相同，所以相位差实际上就是初相位之差。根据相位差，可以确定两个正弦交流电相位之间的关系，一般有以下几种。

（1）超前、滞后。

若 $0<\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1<180°$（或$-180°<\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2<0$），则第二个正弦量比第一个正弦量先达到最大值，就称为前者的相位超前后者，或者说后者的相位滞后前者。

（2）同相。

若 $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1=0$，则两个正弦量同时达到最大值，就称为两个正弦量同相。

（3）反相。

若 $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1=\pm180°$，则一个正弦量达到最大值时，另一个正弦量正好达到负的最大值，就称为这两个正弦量反相。

（4）正交。

若 $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1=\pm90°$，则一个正弦量达到零值时，另一个正弦量正好达到正（或负）的最大值，就称为这两个正弦量正交。

注意：不同频率的正弦量之间不存在相位差的概念。

【例 5-1】已知两个正弦电动势分别为 $e_1=3\sqrt{2}\sin\left(314t+\frac{\pi}{3}\right)$V，$e_2=4\sqrt{2}\sin\left(314t+\frac{\pi}{6}\right)$V。求：

（1）各电动势的最大值和有效值；

（2）周期、频率；

（3）相位、初相位；

（4）说明 e_1、e_2 之间的相位关系。

【解】（1）最大值 $E_{m1}=3\sqrt{2}$V，$E_{m2}=4\sqrt{2}$V。

有效值 $E_1=\frac{3\sqrt{2}}{\sqrt{2}}=3$（V），$E_2=\frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{2}}=4$（V）。

（2）周期 $T_1=\frac{2\pi}{\omega_1}=\frac{2\times3.14}{314}=0.02$（s），$T_2=\frac{2\pi}{\omega_2}=\frac{2\times3.14}{314}=0.02$（s）。

频率 $f_1=\frac{1}{T_1}=\frac{1}{0.02}=50$（Hz），$f_2=\frac{1}{T_2}=\frac{1}{0.02}=50$（Hz）。

（3）相位 $\alpha_1=314t+\frac{\pi}{3}$，$\alpha_2=314t+\frac{\pi}{6}$。

初相位 $\varphi_1=\frac{\pi}{3}$，$\varphi_2=\frac{\pi}{6}$。

（4）相位关系

由 $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1=\frac{\pi}{6}-\frac{\pi}{3}=-\frac{\pi}{6}$可知：$e_2$ 滞后 $e_1\frac{\pi}{6}$（或 e_1 超前 $e_2\frac{\pi}{6}$）。

综上所述，从式（5-2）可以看出：一个正弦交流电可由 3 个特征量来确定，最大值反映

了正弦量的变化范围；角频率反映了正弦量的变化快慢；初相位反映了正弦量的起始状态。因此，常把最大值（或有效值）、角频率（或频率、周期）和初相位称为交流电的三要素。

5.2 正弦交流电的表示方法

为便于分析和计算交流电路，通常可用解析法、波形图法和旋转矢量法三种方法来表示一个正弦交流电。

5.2.1 解析法

解析法是用正弦函数来表示交流电的方法，又称为瞬时表达式法。它是交流电的基本表示方法，在前面已经介绍过，其一般表示形式为

$$e=E_m\sin(\omega t+\varphi_e)$$
$$u=U_m\sin(\omega t+\varphi_u)$$
$$i=I_m\sin(\omega t+\varphi_i)$$

从解析式中可以读出交流电的最大值、角频率和初相位。但在分析和计算正弦交流电时，常会遇到对同频率正弦量进行加、减运算，若采用解析法计算，则要使用大量的计算公式，这给计算带来了很大的麻烦。

5.2.2 波形图法

波形图法是用正弦函数图像来表示交流电的方法，如图 5-2 所示。

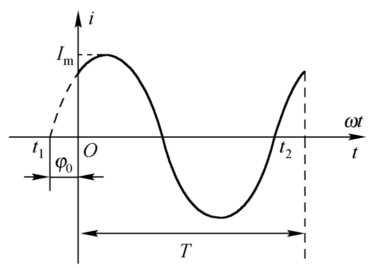


图 5-2　正弦交流电的波形图

从波形图中可看出交流电的最大值、周期（角频率）和初相位。其中 $T=t_2-t_1$，$\varphi_0=-\dfrac{t_1\times 2}{T}\pi$。波形图虽然可以很直观地看出交流电的变化规律，但在计算同频率正弦量的加、减运算方面却非常麻烦。

5.2.3 旋转矢量法

所谓旋转矢量法，是用一个在直角坐标系中绕原点做逆时针方向旋转的矢量来表示正弦交流电的方法。下面以 $e=E_m\sin(\omega t+\varphi_0)$ 为例进行介绍，如图 5-3 所示，在平面直角坐标系中，从原点作一矢量，使其长度等于正弦交流电动势的最大值 E_m，矢量与横轴 Ox 正方向的夹角等于正弦交流电动势的初相位 φ_0，矢量以角速度 ω 沿逆时针方向旋转，这样旋转矢量在任一时刻与横轴 Ox 正方向的夹角就是正弦交流电动势的相位 $\omega t+\varphi_0$，而旋转矢量在纵轴上的投影对应正弦交流电动势的瞬时值。例如，当 $t=0$ 时，旋转矢量在纵轴上的投影为 e_0，相当于图 5-3（b）中

电动势波形的 a 点；当 $t=t_1$ 时，矢量与横轴的夹角为 $\omega t_1+\varphi_0$，此时矢量在纵轴上的投影为 e_1，相当于图 5-3（b）中电动势波形的 b 点；矢量继续旋转就可得到电动势 e 的波形图。

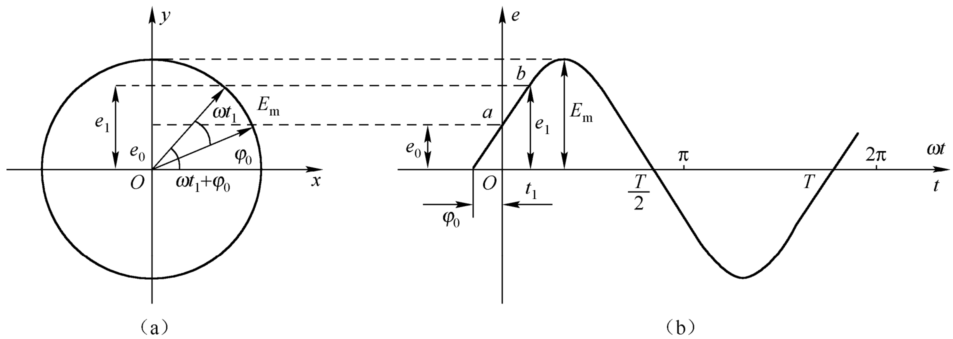


图 5-3　旋转矢量法表示原理

从以上分析可以看出，正弦量可以用一个旋转矢量来表示。矢量以角速度 ω 沿逆时针方向旋转。显然，对于这样的矢量不可能也没有必要把它的每一瞬间的位置都画出来，只要画出它的起始位置即可。因此，一个正弦量只要它的最大值和初相位确定后，表示它的矢量就可以确定了。

注意：交流电本身并不是矢量，因为它们是时间的正弦函数，所以能用旋转矢量的形式来描述它们。为了与速度、力等一般的空间矢量相区别，将表示正弦交流电的这一矢量称为相量。故旋转矢量法又称为相量法。并用大写字母上加黑点的符号来表示，如 $\dot{I}_m$、$\dot{U}_m$ 和 $\dot{E}_m$ 分别表示电流、电压和电动势最大值相量。

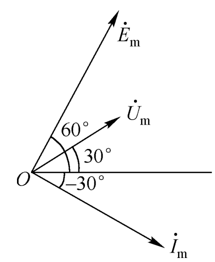


图 5-4　相量图

同频率的几个正弦量的相量，可以画在同一个图上，这样的图称为相量图。画相量图时，首先画出水平正方向，然后根据初相位的正负来确定相量的方向。若某正弦量的初相位为正，则该正弦量用相量表示时，相量应沿水平正方向逆时针方向旋转；若某正弦量的初相位为负，则该正弦量用相量表示时，相量应沿水平正方向顺时针方向旋转。例如，有 3 个同频率的正弦量为 $e=80\sin(\omega t+60°)$ V、$u=40\sin(\omega t+30°)$ V、$i=10\sin(\omega t-30°)$ A，它们的相量图如图 5-4 所示。

由相量图可知：电动势超前电压 30°、电动势超前电流 90°、电压超前电流 60°。

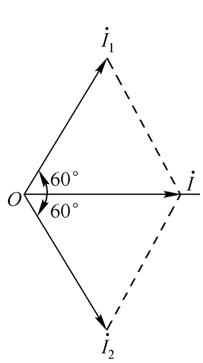


图 5-5　合相量图

在实际问题中遇到的都是有效值，故把相量图中各个相量的长度缩小到原来的$\frac{1}{\sqrt{2}}$，这样相量图中每一个相量的长度不再是最大值，而是有效值，这种相量称为有效值相量，用 $\dot{I}$、$\dot{U}$ 和 $\dot{E}$ 表示。用最大值表示的相量图，称为最大值相量图；用有效值表示的相量，称为有效值相量图。有效值相量图简称相量图。

用相量表示正弦交流电以后，它们的加、减运算就可以按平行四边形法则进行。

【例 5-2】已知 $i_1=10\sqrt{2}\sin(314t+60°)$ A，$i_2=10\sqrt{2}\sin(314t-60°)$ A。求 $i=i_1+i_2$ 的瞬时表达式。

【解】首先画出 i_1 和 i_2 的相量图，然后按平行四边形法则画出合相量 i，如图 5-5 所示。

由相量图求得：$I=I_1=I_2=10$A（等边三角形），$\varphi_i=0$

则　　$$i=i_1+i_2=10\sqrt{2}\sin 314t\ (\text{A})$$

在计算两个同频率正弦量相减（如 $i=i_1-i_2$）时，只要把 i_2 的相量旋转 180°后，再用平行四边形法则来计算即可。即

$$i=i_1-i_2=i_1+(-i_2)$$

由上分析可知：相量法在计算和决定几个同频率交流电之和或差的时候，比解析法和波形图法要简单得多，而且比较直观，同时在相量图中各相量之间的相位关系一目了然，故它是研究交流电的重要工具之一。

5.3 纯电阻电路

交流电路中如果只有电阻，这种电路就称为纯电阻电路，如图 5-6（a）所示。纯电阻电路就是在通电的状态下，只有发热而没有对外面做机械能的功。即电能不能转化为热能以外的能量形式的电路。如白炽电灯、电烙铁、电熨斗、电炉等，它们只是发热，因此，它们都是纯电阻电路。而发动机、电风扇等，除了发热以外，还对外做功，所以这些是非纯电阻电路。

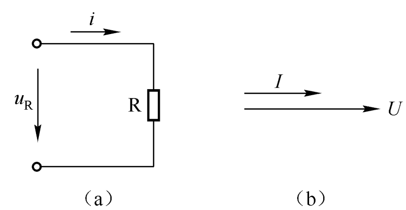


图 5-6　纯电阻电路及其相量图

5.3.1 电流与电压的相位关系

在纯电阻电路中，设加在电阻 R 上的交流电压为

$$u_R=U_{Rm}\sin\omega t$$

实验证明，在任一瞬间通过电阻的电流 i 与加在电阻两端的电压 u_R 符合欧姆定律，即

$$i=\frac{u_R}{R}=\frac{U_{Rm}\sin\omega t}{R}=\frac{U_{Rm}}{R}\sin\omega t \tag{5-9}$$

上式表明：在纯电阻电路中，电流 i 与电压 u_R 是同频率、同相位的正弦量，它们的相量图如图 5-6（b）所示。

5.3.2 电流与电压的数量关系

由式（5-9）还可以看出：

$$I_m=\frac{U_{Rm}}{R} \tag{5-10}$$

若把等式两边同除以$\sqrt{2}$，则得

$$I=\frac{U_R}{R} \tag{5-11}$$

上式表明：在纯电阻的交流电路中，电流与电压的最大值、有效值也都符合欧姆定律。

5.3.3 功率

在交流电路中，电压和电流都是瞬时变化的，任一瞬间电压与电流的瞬时值的乘积称为瞬时功率，用 p_R 表示，即

$$p_R=u_Ri=U_{Rm}\sin\omega t\cdot I_m\sin\omega t=2U_RI\sin^2\omega t=U_RI-2U_RI\cos 2\omega t \tag{5-12}$$

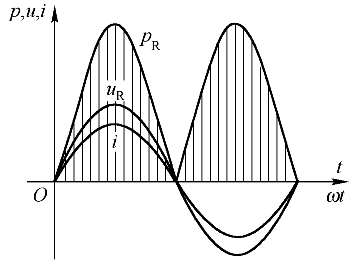


图 5-7　纯电阻电路的瞬时功率曲线

上式表明：瞬时功率也是随时间变化的。将电压和电流瞬时数值逐点相乘，即可画出如图 5-7 所示的瞬时功率曲线。由于电压与电流同相，所以瞬时功率在任一瞬间的数值都是正值或等于零。这说明电阻在电路中始终消耗电能，因此，电阻元器件是一种耗能元器件。

瞬时功率的计算和测量很不方便，一般只用于分析能量的转换过程。为了反映电阻所消耗功率的大小，在工程上常用平均功率（又称为有功功率）表示。所谓平均功率，就是瞬时功率在一个周期内的平均值，用大写字母 P 表示，单位为瓦特（W）。电压、电流用有效值表示时，有功功率 P 的计算与直流电路相同，即

$$P=U_RI=I^2R=\frac{U_R^2}{R} \tag{5-13}$$

【例 5-3】一个 220V、100W 的白炽灯泡接在电压为 $u=220\sqrt{2}\sin(314t-60°)$ V 的电源上。求流过灯泡的电流，写出电流的瞬时表达式，并画出电压和电流的相量图。

【解】由 $P=\frac{U_R^2}{R}$ 得　$R=\frac{U_R^2}{P}=\frac{220^2}{100}=484\ (\Omega)$

由 $P=I^2R$ 得　$I=\sqrt{\frac{P}{R}}=\sqrt{\frac{100}{484}}\approx 0.45\ (\text{A})$

由 $I_m=\sqrt{2}I$ 得　$I_m=\sqrt{2}\times 0.45\approx 0.78\ (\text{A})$

因为在纯电阻电路中，电流与电压同频率、同相位，所以该电流的瞬时表达式为

$$i=0.78\sin(314t-60°)\ \text{A}$$

其电压和电流的相量图如图 5-8 所示。

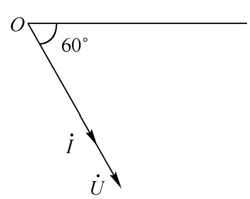


图 5-8　电流与电压的相量图

5.4　纯电感电路

第 4 章介绍过电感线圈，它是电工与电子线路中经常使用的一种元器件。任何电感线圈都含有一定的电阻，由于其电阻较小，通常忽略不计或将电感线圈的电阻集中起来，视电感线圈为电阻元器件与电感元器件串联。首先讨论忽略电阻的电感线圈（称为纯电感）接在交流电路中，其电压与电流的关系。

5.4.1　电流与电压的相位关系

如图 5-9（a）所示，在纯电感电路中，设流过电感 L 中的交流电流为

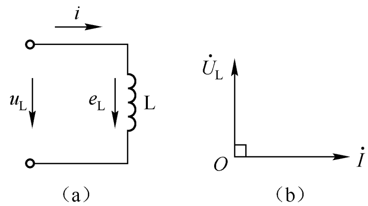


图 5-9　纯电感电路及其相量图

$$i=I_m\sin\omega t$$

通过实验和计算可以证明，此时加在电感线圈两端的电压为

$$u_L=\omega LI_m\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right) \tag{5-14}$$

上式表明：在纯电感电路中，电流 i 与电压 u_L 的频率相同，但在相位上，电压超前电流$\frac{\pi}{2}$。它们的相量图如图 5-9（b）所示。

5.4.2　电流与电压的数量关系

由式（5-14）还可以看出：

$$U_{Lm}=\omega LI_m \tag{5-15}$$

若把上式等号两边同除以$\sqrt{2}$，则得

$$I=\frac{U_L}{\omega L} \tag{5-16}$$

令

$$X_L=\omega L=2\pi f_L \tag{5-17}$$

则式（5-16）可表示为

$$I=\frac{U_L}{X_L} \tag{5-18}$$

上式表明：在纯电感的交流电路中，电流与电压也符合欧姆定律。

X_L 是表示电感线圈对交流电流阻碍作用大小的一个物理量，与纯电阻电路中的电阻 R 相当，称为感抗，单位为欧姆（Ω）。从式（5-17）中可以看出，频率越高，感抗越大；频率越低，感抗越小。对于直流电来说，由于频率为零，则感抗也为零，即电感在直流电路中相当于短路。因此，电感有“通直流，阻交流”和“通低频，阻高频”的特性。

注意：感抗 X_L 只等于电感元器件上电压与电流的最大值或有效值之比，不等于它们瞬时值之比，这是因为 u_L 和 i 相位不同。而且感抗只对正弦电流才有意义。

5.4.3　功率

纯电感电路中的瞬时功率为

$$p_L=u_Li$$

$$=U_{Lm}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)I_m\sin\omega t$$

$$=2U_LI\sin\omega t\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$$

$$=U_LI\sin2\omega t \tag{5-19}$$

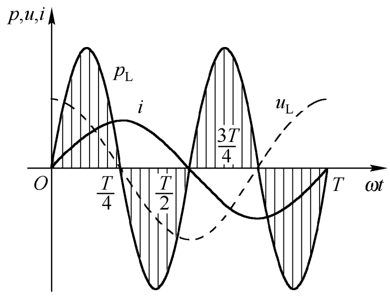


图 5-10　纯电感电路的瞬时功率曲线

由此可知，瞬时功率也是一条正弦曲线，其频率为电源频率的 2 倍，波形图如图 5-10 所示。由图可见，在电流变化的一个周期内，瞬时功率变化两周，在第一和第三个$\frac{1}{4}$周期内，p_L为正值，即电感线圈吸收电能并转换成磁场能，且将磁场能储存在线圈的磁场中。在第二和第四个$\frac{1}{4}$周期内，p_L为负值，即电感线圈释放磁场能并转换为电能还给电源。这样在一个周期内纯电感电路的平均功率为零，也就是说，在纯电感电路中，电感元器件是不消耗电源的任何能量，只是与电源进行着能量交换。因此电感元器件是一种储能元器件。

为了反映电感元器件与电源之间进行能量交换的规模，我们把瞬时功率的最大值，称为电感元器件的无功功率，用符号 Q_L 表示，单位为乏（var），其数学表达式为

$$Q_L=U_LI=I^2X_L=\frac{U_L^2}{X_L} \tag{5-20}$$

注意：“无功”的含义是“交换”而不是“消耗”，它是相对“有功”而言的，绝不能理解为“无用”。无功功率在生产实践中占有很重要的地位，具有电感性质的变压器、电动机等设备都是靠电磁转换工作的。

【例 5-4】可以忽略电阻的某电感线圈，其电感 $L=100\text{mH}$，把它接到 $u=220\sqrt{2}\sin(314t-60°)$ V 的电源上，试写出电流的瞬时表达式、画出电流与电压的相量图，并求电路的无功功率。

【解】由 $u=220\sqrt{2}\sin(314t-60°)$ V，可知：

$$U_L=220\text{V}\qquad \omega=314\text{rad/s}\qquad \varphi_u=-60°$$

由 $X_L=\omega L$ 得

$$X_L=314\times100\times10^{-3}=31.4\ (\Omega)$$

由 $I=\frac{U_L}{X_L}$得

$$I=\frac{220}{31.4}\approx7\ (\text{A})$$

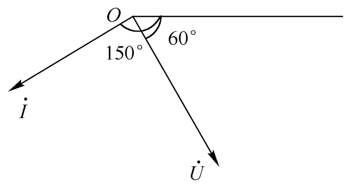


图 5-11　电流与电压的相量图

因为在纯电感电路中，电压超前电流 90°，即：φ_u-φ_i＝90°。

所以 φ_i＝φ_u-90°＝-60°-90°＝-150°。

则 i＝$I_m$sin（ωt＋φ_i）＝$7\sqrt{2}$sin（314t-150°）A。

电流与电压的相量图如图 5-11 所示。

由 Q_L＝U_LI 可知，

$$Q_L = 220\times7 = 1540\ (\text{var})$$

5.5　纯电容电路

在交流电路中，如果只用电容器作为负载，而且电容器的绝缘电阻很大，介质的损耗可以忽略，那么这个电路就称为纯电容电路，如图 5-12（a）所示。

5.5.1　电流与电压的相位关系

在纯电容电路中，设加在电容器 C 两端的交流电压为

$$u_C = U_{Cm}\sin\omega t$$

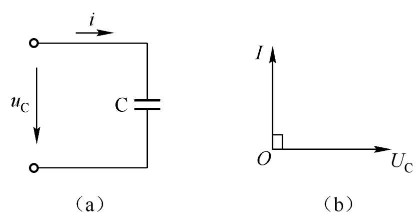


图 5-12　纯电容电路及其相量图

通过实验和计算可以证明，此时流过电容器 C 的电流为

$$i = \omega CU_{Cm}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right) \tag{5-21}$$

上式表明：在纯电容电路中，电流 i 与电压 u_C 的频率相同，但在相位上，电压滞后电流$\frac{\pi}{2}$。它们的相量图如图 5-12（b）所示。

5.5.2　电流与电压的数量关系

由式（5-21）可以看出：　$I_m = \omega CU_{Cm}$　（5-22）

若把式（5-22）等号两边同除以$\sqrt{2}$，则得

$$I = \omega CU_C \tag{5-23}$$

令
$$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC} \tag{5-24}$$

则式（5-16）可表示为

$$I=\frac{U_C}{X_C} \tag{5-25}$$

上式表明：在纯电容的交流电路中，电流与电压也符合欧姆定律。

X_C是表示电容器对交流电流阻碍作用大小的一个物理量，与纯电阻电路中的电阻 R 相当，称为容抗，单位欧姆（Ω）。从式（5-24）中可以看出，对于交流电，频率越高，容抗越小；频率越低，容抗越大。对于直流电来说，$f=0$，$X_C=\infty$，即电容器接在直流电路中可视为断路。因此，电容器有“通交流、隔直流，通高频，阻低频”的特性。

5.5.3 功率

纯电容电路中的瞬时功率为

$$\begin{aligned}p_C&=u_Ci\\&=U_{Cm}\sin\omega tI_m\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)\\&=2U_CI\sin\omega t\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)\\&=U_CI\sin2\omega t\end{aligned} \tag{5-26}$$

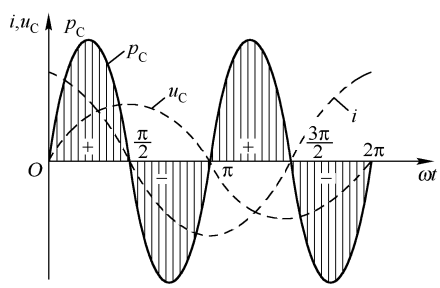


图 5-13　纯电容电路的瞬时功率曲线

由此可知，电容器的瞬时功率与电感的瞬时功率一样，也是一条正弦曲线，其频率为电源频率的 2 倍，波形图如图 5-13 所示。由图可见，纯电容电路的平均功率为零，但是电容与电源之间进行着能量的交换。在第一个和第三个$\frac{1}{4}$周期内，电容器吸收电源能量并以电场能的形式储存起来；在第二和第四个$\frac{1}{4}$周期内，电容器又向电源释放能量。与纯电感电路一样，瞬时功率的最大值被定义为电路的无功功率，用来表示电容器与电源交换能量的规模。其数学表达式为

$$Q_C=U_CI=I^2X_C=\frac{U_C^2}{X_C} \tag{5-27}$$

【例 5-5】若把一个电容量为 10μF 的电容器，接到电压为 $u=220\sqrt{2}\sin(314t-60°)$ V 的电源上，试写出电流的瞬时表达式，画出电流与电压的相量图，并求电路的无功功率。

【解】由 $u=220\sqrt{2}\sin(314t-60°)$ V 可知：
$U_C=220$V，$\omega=314$rad/s，$\varphi_u=-60°$。
由 $X_C=\dfrac{1}{\omega C}$得

$$X_L=\frac{1}{314\times10\times10^{-6}}\approx318\ (\Omega)$$

由 $I=\dfrac{U_C}{X_C}$得

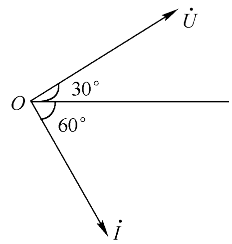


图 5-14　电流与电压的相量图

$$I=\frac{220}{318}\approx0.7\ (\text{A})$$

因为在纯电容电路中，电压滞后电流 90°，即：$\varphi_i-\varphi_u=90°$。
所以

$$\varphi_i=\varphi_u+90°=-60°+90°=30°$$

则

$$i=I_m\sin(\omega t+\varphi_i)=0.7\sqrt{2}\sin(314t+30°)\ \text{A}$$

电流与电压的相量图如图 5-14 所示。
由 $Q_C=U_CI$ 可知

$$Q_C=220\times0.7=154\ (\text{var})$$

5.6　RL 串联电路

在含有线圈的交流电路中，当线圈的电阻不能忽略时，就构成了由电阻 R 和电感 L 串联的交流电路，简称 RL 串联电路。常见的电动机、变压器及日常生活中的日光灯等都可以看成是一个电阻与电感串联的电路。

5.6.1　电流与电压的相位关系

如图 5-15（a）所示，设流过 RL 串联电路的电流 $i=I_m\sin\omega t$，根据前面所学的知识可知：
电阻两端的电压：　$u_R=U_{Rm}\sin\omega t$
电感两端的电压：　$u_L=U_{Lm}\sin\left(\omega t+\dfrac{\pi}{2}\right)$
由基尔霍夫电压定律可得：　$u=u_R+u_L=U_{Rm}\sin\omega t+U_{Lm}\sin\left(\omega t+\dfrac{\pi}{2}\right)$

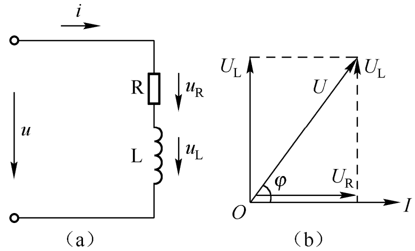


图 5-15　RL 串联电路和相量图

在相量图中画出电流、电阻两端电压和电感两端电压的相量，如图 5-15（b）所示。根据相量的加法运算可知，电阻两端电压 U_R、电感两端电压 U_L 和串联电路的总电压 U 三者之间构成了一个直角三角形，称为电压三角形。则

$$U=\sqrt{U_R^2+U_L^2} \tag{5-28}$$

总电压超前电流

$$\varphi=\arctan\frac{U_L}{U_R} \tag{5-29}$$

在交流电路中，若总电压的相量超前总电流，则将这样的电路称为感性电路；此时交流电路的负载称为感性负载。

5.6.2 电流与电压的数量关系

由于在纯电阻电路中 $U_R=IR$，在纯电感电路中 $U_L=IX_L$，则在 RL 串联电路中，由式（5-28）可得：

$$U=\sqrt{U_R^2+U_L^2}=\sqrt{(IR)^2+(IX_L)^2}=I\sqrt{R^2+X_L^2}$$

即

$$I=\frac{U}{\sqrt{R^2+X_L^2}}$$

令 $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$，则在 RL 串联电路中电流与电压的数量关系为

$$I=\frac{U}{Z} \tag{5-30}$$

上式表明：在 RL 串联的交流电路中，电流与电压也符合欧姆定律。式中，Z 称为电路的阻抗，它表示电阻和电感串联电路对交流电的总阻碍作用，其单位仍然为欧姆（Ω）。

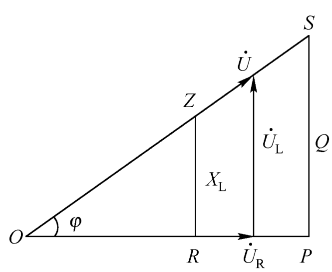


图 5-16　RL 串联的电压三角形、阻抗三角形和功率三角形

由 $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$ 可见，电阻 R、感抗 X_L 和阻抗 Z 三者之间也构成一个与图 5-15（b）相似的三角形，称为阻抗三角形，如图 5-16 所示。由图可得

$$\varphi=\arctan\frac{X_L}{R} \tag{5-31}$$

注意：电压三角形是相量三角形，而阻抗三角形则不是相量三角形。

5.6.3 功率与功率因数

由于电阻是耗能元器件，而电感是储能元器件，因此在 RL 串联电路中的功率既有有功功率，又有无功功率。

1．有功功率

在 RL 串联电路中，因为只有电阻是耗能元器件，所以电阻消耗的功率就是 RL 串联电路的有功功率。即

$$P=U_{\mathrm{R}}I=I^2R=\frac{U_{\mathrm{R}}^2}{R}$$

由图 5-15（b）可知：$U_{\mathrm{R}}=U\cos\varphi$

则
$$P=U_{\mathrm{R}}I=IU\cos\varphi \tag{5-32}$$

2．无功功率

在 RL 串联电路中，因为电感是储能元器件，所以电感与电源作能量交换时的无功功率就是 RL 串联电路的无功功率。即

$$Q=U_{\mathrm{L}}I=I^2X_{\mathrm{L}}=\frac{U_{\mathrm{L}}^2}{X_{\mathrm{L}}}$$

由图 5-15（b）可知：$U_{\mathrm{L}}=U\sin\varphi$，则

$$Q=U_{\mathrm{L}}I=IU\sin\varphi \tag{5-33}$$

3．视在功率

对于电源来说，其输出的总电流与总电压有效值的乘积定义为视在功率，用 S 表示，单位伏安（V · A）或千伏安（kV · A）。即

$$S=IU \tag{5-34}$$

视在功率代表电源所能提供的功率。许多电气设备（如变压器）是按照一定的额定电压和额定电流来设计使用的，所以通常用视在功率来表示设备的容量。

式（5-32）与式（5-33）等号两边平方后相加可得

$$P^2+Q^2=(IU\cos\varphi)^2+(IU\sin\varphi)^2=(IU)^2=S^2 \tag{5-35}$$

由此可见，有功功率、无功功率与视在功率三者之间也构成一个直角三角形，称为功率三角形。如图 5-16 所示，功率三角形也不是相量三角形，但与电压三角形、阻抗三角形相似，由图可得

$$\varphi=\arctan\frac{Q}{P} \tag{5-36}$$

4．功率因数

由功率三角形可知，电源提供的功率不能被感性负载完全吸收，这样就存在着电源功率的利用问题。为了反映电源的利用率，我们把有功功率与视在功率的比值称为电路的功率因数，用 λ 表示。即

$$\lambda = \frac{\text{有功功率}}{\text{视在功率}}$$

由功率三角形、阻抗三角形和电压三角形可知：

$$\lambda = \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U} \tag{5-37}$$

【例 5-6】将一个电感为 1.65H、电阻为 300Ω 的线圈串联到电压为 $u = 220\sqrt{2}\sin(314t - 60°)$V 的电源上，试求电路的有功功率、无功功率、视在功率和功率因数。

【解】由 $u = 220\sqrt{2}\sin(314t - 60°)$V，可知：

$$U = 220\text{V} \qquad \omega = 314\text{rad/s} \qquad \varphi_u = -60°$$

由 $X_L = \omega L$ 得　　$X_L = 314 \times 1.65 = 518.1$（Ω）

由 $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ 得　　$Z = \sqrt{300^2 + 518.1^2} \approx 600$（Ω）

由 $I = \dfrac{U}{Z}$ 得 $I = \dfrac{220}{600} = 0.365$（A）

由 $P = I^2R$ 得 $P = 0.365^2 \times 300 \approx 40$（W）

由 $Q = I^2X_L$ 得　　$Q = 0.365^2 \times 518.1 \approx 70$（var）

由 $S = IU$ 得　　$S = 0.365 \times 220 \approx 80$（VA）

由 $\cos\varphi = \dfrac{P}{S}$ 得　　$\cos\varphi = \dfrac{40}{80} = 0.5$

由式（5-37）可知，在电源提供的功率一定的情况下，电路的功率因数越大，则电路的有功功率就越大，即电源所发出的电能转换为热能或机械能就越多，而电源与电感或电容之间相互交换的能量就越少，电源的利用率就越高。由式（5-32）可知，在同一电压下，要输送同一功率，功率因数越大，则线路中电流越小，即线路中的损失也越小。因此，在电力工程上，力求电路的功率因数接近于 1。

【例 5-7】某变电所输出的电压为 220V，额定视在功率为 220kV · A。如果给电压为 220V、功率因数为 0.75、额定功率 33kW 的单位供电，请问能供给几个这样的单位？若把功率因数提高到 0.9，又能供给几个这样的单位？

【解】由 $S = IU$ 得，变电所能够提供的总电流：

$$I_N = \frac{S}{U} = \frac{220 \times 10^3}{220} = 1000\text{（A）}$$

（1）由 $P = IU\cos\varphi$ 得，当 $\cos\varphi = 0.75$ 时，一个单位所需电源提供的电流：

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi} = \frac{33 \times 10^3}{220 \times 0.75} = 200\text{（A）}$$

所以变电所能供给这样的单位个数为

$$\frac{I_N}{I} = \frac{1000}{200} = 5\text{（个）}$$

（2）由 $P = IU\cos\varphi$ 得，当 $\cos\varphi = 0.9$ 时，一个单位所需电源提供的电流：

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi} = \frac{33 \times 10^3}{220 \times 0.9} \approx 166.67\text{（A）}$$

所以变电所能供给这样的单位个数为：

$$\frac{I_N}{I} = \frac{1000}{166.67} \approx 6\text{（个）}$$

由此例题可以知道，在实际工作中要设法提高电路的功率因数。目前提高电路的功率因数常采用以下两种方法。

（1）提高自然功率因数，避免大马拉小车。即合理选用电动机，不要用大容量的电动机来带动小功率负载，另外，尽量不要让电动机空转。

（2）在感性负载两端并联适当的电容器。

5.7 RLC 串联电路*

5.7.1 串联电路

由电阻、电感和电容串联组成的电路称为 RLC 串联电路。RLC 串联电路是一个很典型的电路，在很多实际电路中得到了应用，如无线电技术中电压谐振就属于这种电路，如图 5-17 所示。

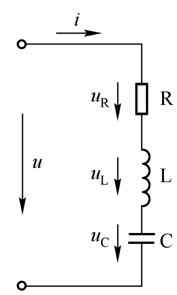


图 5-17　RLC 串联交流电路

1．电流与电压的相位关系

设流过 RLC 串联电路的电流 $i=I_m\sin\omega t$，根据前面所学的知识可知：

电阻两端的电压：　$u_R=U_{Rm}\sin\omega t$

电感两端的电压：　$u_L=U_{Lm}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$

电容器两端的电压：　$u_C=U_{Cm}\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)$

由基尔霍夫电压定律可得：

$$u=u_R+u_L+u_C=U_{Rm}\sin\omega t+U_{Lm}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)+U_{Cm}\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)$$

在相量图中画出电流、电阻两端电压、电感两端电压和电容器两端电压的相量，如图 5-18 所示。根据相量的加法运算可知，电阻两端电压 U_R、电感两端电压 U_L 与电容器两端电压 U_C 的差值 U_X、串联电路的总电压 U 三者之间构成了一个直角三角形。即

$$U=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2} \tag{5-38}$$

电压与电流之间的相位差为

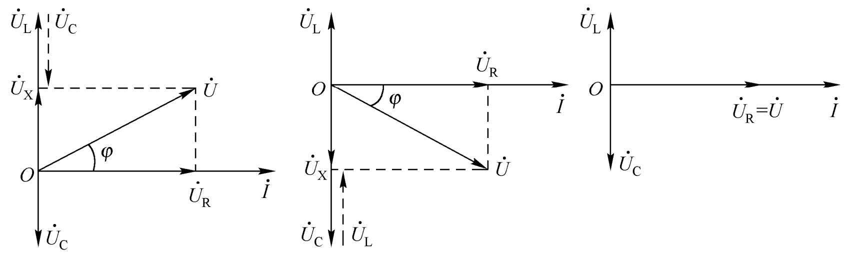
$$\varphi=\arctan\frac{U_L-U_C}{U_R}=\arctan\frac{IX_L-IX_C}{IR}=\arctan\frac{X_L-X_C}{R}=\arctan\frac{X}{R} \tag{5-39}$$

式中，$X=X_L-X_C$ 称为电抗，表示感抗与容抗的差值，其单位为欧姆（Ω）。由式（5-39）可以看出，RLC 串联电路中电压与电流之间的相位关系取决于电阻、电感和电容。

（1）当 $X_L>X_C$ 时，$U_L>U_C$，$\varphi>0$，这时 RLC 串联电路的总电压超前电流 φ 角，这样的电路称为感性电路，其负载称为感性负载，相量图如图 5-18（a）所示。

（2）当 $X_L<X_C$ 时，$U_L<U_C$，$\varphi<0$，这时 RLC 串联电路的总电压滞后电流 φ 角，这样的电路称为容性电路，其负载称为容性负载，相量图如图 5-18（b）所示。

（3）当 $X_L=X_C$ 时，$U_L=U_C$，$\varphi=0$，这时 RLC 串联电路的总电压与电流同相位，这样的电路称为阻性电路，并称电路的这种状态为谐振，相量图如图 5-18（c）所示。



（a）$\varphi>0$　　（b）$\varphi<0$　　（c）$\varphi=0$

图 5-18　RLC 串联交流电路的电流与电压的相量图

2．电流与电压的数量关系

由于在纯电阻电路中 $U_R=IR$，在纯电感电路中 $U_L=IX_L$，在纯电容电路中 $U_C=IX_C$，则在 RLC 串联电路中，由式（5-38）可得：

$$U=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2}=\sqrt{(IR)^2+(IX_L-IX_C)^2}=I\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=I\sqrt{R^2+X^2}$$

令 $Z=\sqrt{R^2+X^2}$，则在 RLC 串联电路中电流与电压的数量关系为

$$I=\frac{U}{Z} \tag{5-40}$$

上式表明：在 RLC 串联的交流电路中，电流与电压也符合欧姆定律。式中 $Z=\sqrt{R^2+X^2}$ 称为电路的阻抗，它表示 RLC 串联电路对交流电的总阻碍作用，其单位为欧姆（Ω）。

由 $Z=\sqrt{R^2+X^2}$ 可见，电阻 R、电抗 X 和阻抗 Z 三者之间也构成一个与图 5-16 相似的三角形，称为阻抗三角形，如图 5-19 所示。

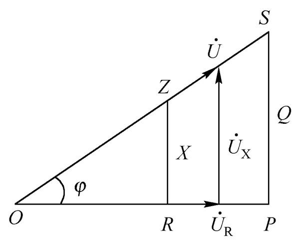


图 5-19　阻抗三角形、电压三角形和功率三角形

3．电路的功率和功率因数

1）有功功率

在 RLC 串联电路中，因为只有电阻是耗能元器件，因此电阻消耗的功率就是该电路的有功功率，即

$$P=U_RI=I^2R=\frac{U_R^2}{R}=IU\cos\varphi \tag{5-41}$$

2）无功功率

在 RLC 串联电路中，因为电感和电容都与电源进行能量交换，所以都有无功功率。但由图 5-18 可知，电感两端的电压 u_L 与电容器两端的电压 u_C 是反相的，也就是说它们的瞬时功率变化状态是相反的，即当 $Q_L=U_LI$ 为正值（电感吸收能量）时，$Q_C=U_CI$ 为负值（电容器释放能量）；反过来，当 $Q_C=U_CI$ 为正值（电容器吸收能量）时，$Q_L=U_LI$ 为负值（电感释放能量）。它们之间进行能量交换的差值才与电源进行交换，即只有电感和电容相互交换能量的不足部分，才与电源进行交换，所以整个电路的无功功率为

$$Q=Q_L-Q_C=U_LI-U_CI=(U_L-U_C)I=U_XI=UI\sin\varphi \tag{5-42}$$

3）视在功率

根据视在功率的定义可知

$$S = UI \tag{5-43}$$

其单位是伏安（VA）。

由式（5-41）、式（5-42）和式（5-43）可得

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} \tag{5-44}$$

由式（5-44）可见，在 RLC 串联电路中，有功功率、无功功率和视在功率三者之间也构成了一个直角三角形，称为功率三角形，如图 5-19 所示。

由图 5-19 可知，电压三角形、阻抗三角形和功率三角形相似，但电压三角形是相量三角形，而阻抗三角形和功率三角形却不是相量三角形。且

$$\varphi = \arctan\frac{Q}{P} = \arctan\frac{Q_L - Q_C}{P} \tag{5-45}$$

4）电路的功率因数

$$\lambda = \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U} \tag{5-46}$$

5.7.2 串联谐振

在前面介绍的 RLC 串联电路中，当电路中的感抗与容抗相等时，整个电路呈现纯电阻特性。当电路总电压 u 与电路中的电流 i 相位相同时，电路产生谐振，称为串联谐振。

1．谐振条件和谐振频率

根据谐振概念，由图 5-18（c）可知

$$\varphi = \arctan\frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctan\frac{IX_L - IX_C}{IR} = \arctan\frac{X_L - X_C}{R} = 0$$

则 RLC 电路发生串联谐振的条件是

$$X_L = X_C \tag{5-47}$$

即

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

若谐振时的频率用 f_0 表示，则

$$2\pi f_0 \mathrm{L} = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

所以，谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{5-48}$$

由式（5-48）可知，串联谐振的频率 f_0 由电路元器件的参数 L、C 决定。当电路中的电感量和电容量一定时，f_0 就有确定的数值，所以 f_0 也称为固有频率。

2．调谐方式

使电路满足谐振条件的方法称为调谐方式，调谐方式常有以下两种方法。

（1）保持电路参数不变，改变电源的工作频率，使电路发生谐振。

由式（5-48）可知，串联电路的谐振频率f_0只取决电路中电感与电容的大小，是电路所固有的，只有当电源的工作频率与电路的固有频率相等时，电路才能发生谐振。

（2）调整电路参数 L 或 C，使电路谐振。

当电源频率一定时，由式（5-48）可知，调整电路参数 L 或 C，使电路的固有频率等于电源的频率，电路同样也会发生谐振。例如，收音机的输入回路就是一个串联谐振电路，通过改变输入回路电容的大小，使回路与某一电台的发射频率发生谐振，以达到选择该电台信号的目的。

3．串联谐振电路的特点

（1）串联谐振时，电路阻抗最小，且呈纯阻性

$$Z_0=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=R \tag{5-49}$$

（2）电路中电流最大，并与电压同相，谐振电流为

$$I_0=\frac{U}{Z}=\frac{U}{R} \tag{5-50}$$

（3）电阻两端电压等于总电压，电感和电容两端的电压相等，其大小为总电压的 Q 倍。

$$U_R=I_0R=\frac{U}{R}R=U \tag{5-51}$$

$$U_L=U_C=I_0X_L=I_0X_C=\frac{U}{R}\omega_0L=\frac{U}{R}\qquad\frac{1}{\omega_0C}=QU \tag{5-52}$$

式中，Q 称为电路的品质因数，其值为

$$Q=\frac{\omega_0L}{R}=\frac{1}{\omega_0CR} \tag{5-53}$$

由于一般串联电路的电阻值很小，所以电路的 Q 值比较大，其值约为几十，有的可达几百。因为串联谐振时，电感和电容元器件两端可能会产生比总电压高出 Q 倍的高电压，因此串联谐振也叫电压谐振。线圈的电阻越小，电路消耗的能量也越小，则表示电路品质好，品质因数高；若线圈的电感量越大，储存的能量也就越多，而损耗一定时，同样也说明电路品质好，品质因数高。

（4）谐振时，电能只供给电路中的电阻消耗，电源与电路之间不再进行能量交换，而电感与电容之间进行磁场能与电场能的交换。

5.8 技能训练 6　交流电流表、交流电压表及电能表的使用

5.8.1 技能训练目标

（1）学习交流电压表、交流电流表的使用。

（2）学习单相功率表的接线和测量。

（3）学习电能表的接线和测量。

（4）了解交流参数的测量和计算。

5.8.2　技能训练仪器与器件

（1）交流电压表 T21－V。
（2）交流电流表 T21－A。
（3）单相功率表 D25－W。
（4）单相电能表（电度表）。
（5）单相自耦调压器。
（6）电感线圈、电阻、灯泡和连接导线。

5.8.3　技能训练内容与步骤

（1）用图 5-20 所示单相自耦调压器连接不同负载，调节不同的输出电压，用交流电压表和交流电流表测量并记录数据，填入表 5-1 中。



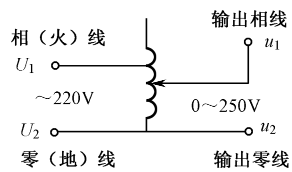


图 5-20　单相自耦调压器

表 5-1　单相自耦调压器连接不同负载测量

电压值 U（V）					
电流值 I（A）					

（2）用单相功率表测量交流电路中的有功功率。

单相功率表为电动式仪表，横向的两个端子为电流线圈，纵向的两个端子为电压线圈。单相功率表的指针偏转是靠电流线圈和电压线圈通电后产生电磁力驱动的。两个线圈均有标记“＊”的端子，称为（互感线圈）同名端，若电流从电流线圈的同名端流入，电压的高电位接在电压线圈的同名端，则功率表的指针为正偏转。功率表的读数值为所连接的电流挡数值和电压挡数值的乘积。

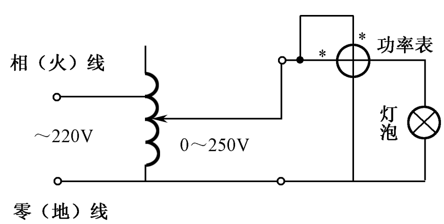


图 5-21　单相功率表测量电路

按照如图 5-21 所示单相功率表测量电路接线，并调节自耦调压器输出不同的电压，或者连接不同功率的负载灯泡，分别测量并记录电流、电压和功率值，填入表 5-2 中。

表 5-2　单相功率表测量

序　　号	1	2	3	4	5	6
电压值（V）						
电流值（A）						
功率测量值（W）						

（3）用单相电度表测量交流电路中消耗的有功电能值。

单相电度表外形如图 5-22 所示。按照图 5-23 所示单相电度表结构示意图，将单相电度表接入电源并连接负载（也可接入上面单相功率表测量电路的电源侧），用功率表的读数和秒表时间配合，或者用交流电压（流）表的读数和秒表时间配合，来校验单相电度表的测量值，将测量值填入表 5-3 中。

表 5-3　单相电度表测量

序　　号	1	2	3	4	5	6
表盘旋转（转）						
旋转时间（秒）						
计算值（度）						
计算公式	消耗电能（度）＝表盘旋转（转）×旋转时间（秒）÷（3600 秒×M 转/度）					

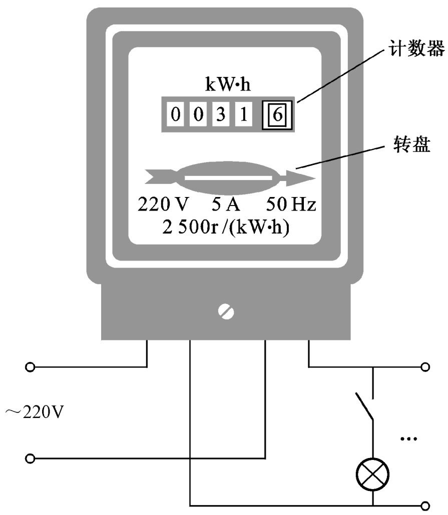


图 5-22　单相电度表外形

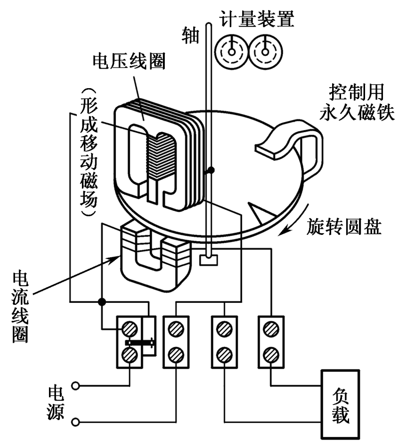


图 5-23　单相电度表结构示意图

（4）将上述的负载加入感性负载（线圈）后，再分别测量、记录并分析，将测量结果填入表 5-4 中。

表 5-4　感性负载测量（三表法）

序　　号	1	2	3	4	5	6
电压值 U（V）						
电流值 I（A）						
功率值 P（W）						
电阻值 R（Ω）						
阻抗值 Z（Ω）						
电感值 L（H）						
计算公式	$Z=U/I$，$R=P/I^2$，$L=\sqrt{Z^2-R^2}$					

5.8.4 注意事项

（1）本实验中电源电压较高，身体不要触及带电部分，以保证安全。
（2）在测量时要选择合适的交流电压表、交流电流表量程，以确保测量值的精确性。
（3）单相功率表测量时，亦应选择合适的电流挡和电压挡量程。
（4）电度表的接线应注意输入端子和输出端子的标识，以保证转盘正转。

5.8.5 创新能力的启发和培养

怎样测量和计算交流参数？

提示：在含有感性负载或者容性负载的交流电路中，阻抗 $Z=\sqrt{R^2+X^2}$ ，试用三表法测量和计算交流参数。

5.8.6 思考问题

（1）如果自耦调压器不按图 5-20 所示连接交流电源，使用时会发生什么情况？
（2）试分析功率表的同名端不连接在一起时，测量结果会有什么问题？
（3）如果将单相电度表的输入端和输出端接反会出现什么情况？

5.8.7 实训要求

（1）按图 5-20 所示连接电路，并接入交流电压表和交流电流表，用自耦调压器调节不同的输出电压，记录电压和电流值；并且记录实训内容 2 和 3 测量的数据。
（2）设计“ 创新能力的启发和培养 ”的测量电路，并试着测量和记录数据。
（3）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 5

1. 正弦交流电的三要素是什么？
2. 正弦交流电流的有效值物理含义是什么？
3. 怎样理解电容储存电场能量？而电感储存磁场能量？
4. 交流电路的视在功率、有功功率和无功功率分别使用在什么场合？
5. 交流电路的谐振是什么物理现象？所谓的电压谐振和电流谐振表示什么？

教学微视频

扫一扫

第 6 章 三相正弦交流电路

【本章学习目标】

1. 了解三相正弦交流电的产生，理解相序的意义.
2. 掌握三相交流电的特点和表示方法。
3. 掌握三相电源绕组及三相负载的连接。
4. 掌握对称三相电路中相电压与线电压、相电流与线电流的关系。
5. 熟悉中线的作用。
6. 掌握对称三相交流电路的功率计算方法。

【教学目标】

1. 知识目标：了解三相制的优点和应用情况，充分认识到三相交流电在生产实际中的重要性。

2. 能力目标：通过三相电路的测量，掌握三相四线制供电系统中中线的作用。

【教学重点】

三相电源星形连接的相电压和线电压的关系、三相负载的连接。

【教学难点】

三相负载三角形连接的相电流和线电流的关系、中线的作用。

【教学方法】

读书指导法、参观法、讨论法、实习作业法。

6.1 三相交流电源

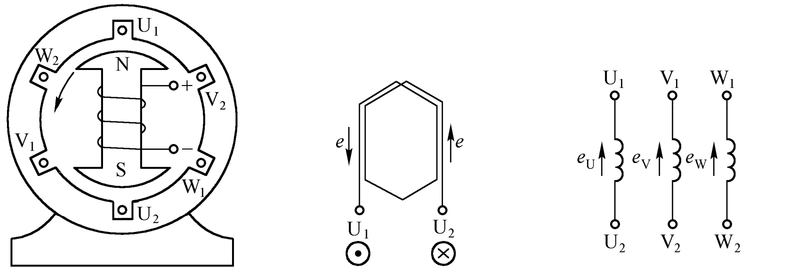
目前，电能的生产、输送和分配几乎都采用三相交流电。采用三相电源供电的主要原因有：①在输送功率相同、电压相同、距离相同，功率因数和线路损耗相等的情况下，采用三相输电比用单相输电可节约 25%左右的材料；②作为生产机械主要动力的电动机，三相电动机比同容量的单相电动机结构简单、性能好、工作可靠、造价低。

三相电源是由三个频率相同、幅值相同、相位互差 120°的正弦电压源按一定方式连接而成的。由三相电源供电的电路称为三相电路。第 5 章中所讨论的单相交流电路是对应三相电路中的一相。

6.1.1 三相对称电动势的产生

三相电动势是由三相交流发电动机产生的。图 6-1 (a) 所示为三相交流发电动机的示意图，它主要由定子和转子构成。在定子中嵌入了 3 个绕组，每一个绕组为一相，统称三相绕组。三相绕组的始端分别用 U_1、V_1、W_1 表示，末端分别用 U_2、V_2、W_2 表示。转子是一对磁极的电

磁铁，它以角速度 ω 逆时针方向旋转。若各绕组的几何形状、尺寸、匝数均相同，如图 6-1（b）所示，安装时 3 个绕组彼此相隔 120°，磁感应强度沿转子表面按正弦规律分布，则在三相绕组中可以分别感应出最大值相等、频率相同、相位互差 120°的三个正弦电动势 e_U、e_V、e_W，这种三相电动势称为对称三相电动势。电动势的参考方向选定为绕组的末端指向始端，如图 6-1（c）所示。



（a）三相交流发电机结构示意图　（b）定子绕组　（c）对称三相定子绕组及电动势

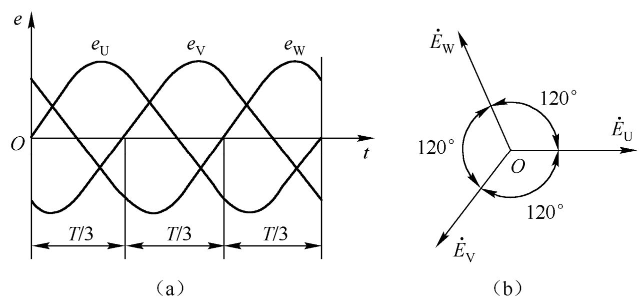
图 6-1　三相交流发电动机

6.1.2 三相对称电动势的表示法

若以三相对称电动势中的 U 相绕组电动势的初相位为零，并规定三相电动势的正方向都是从末端指向始端，则三相对称电动势用解析式表示为：

$$\left.\begin{aligned} e_U &= E_m \sin\omega t \\ e_V &= E_m \sin(\omega t - 120°) \\ e_W &= E_m \sin(\omega t - 240°) = E_m \sin(\omega t + 120°) \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}1)$$

波形图和相量图如图 6-2（a）、图 6-2（b）所示。



（a）　（b）

图 6-2　三相交流电的波形图、相量图

由相量图可知，如果把 3 个电动势的相量加起来，相量和为零。由波形图可知，三相对称电动势在任一瞬间的代数和为零，即

$$e_U + e_V + e_W = 0 \qquad (6\text{-}2)$$

6.1.3 相序

由三相对称电动势的波形图可以看出，三相电动势达到最大值的时间是不同的，通常把三相电动势依次达到正最大值的顺序称为相序。若相序为 U—V—W—U，则称为正序或顺序，

如图 6-2 所示的相序即为正序；不同于正序的相序称为负序或逆序，如 V—U—W—V。工程上通用的相序是正序。

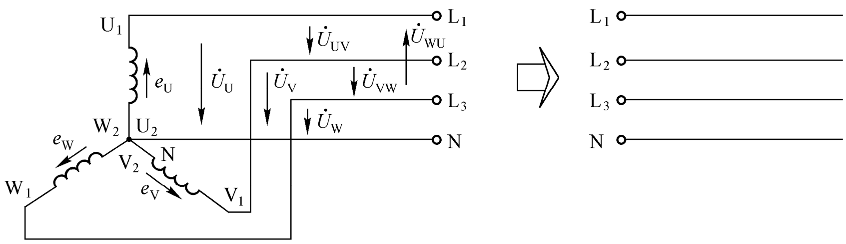
相序是一个十分重要的概念，为使电力系统能够安全可靠地运行，通常统一规定技术标准，一般配电盘上用黄色标出 U 相，用绿色标出 V 相，用红色标出 W 相。

6.1.4 三相交流电源的连接

三相发电动机的三相绕组按照一定的连接方式向外送电，其连接方法有两种，一种是星形连接（Y），一种是三角形连接（Δ）。

1．电源的星形连接

将发电动机三相绕组的末端 U_2、V_2、W_2 连接在一起成为一个公共点，始端 U_1、V_1、W_1 分别与负载相连，这种连接方法就称为三相电源的星形连接，用符号 Y 表示，如图 6-3（a）所示。从始端 U_1、V_1、W_1 引出的三根线称为相线或端线，俗称火线；末端接成的一点称为中性点，简称中点，用 N 表示；从中性点引出的输电线称为中性线，简称中线。低压供电系统的中性点是直接接地的，把接大地的中性点称为零点，而把接地的中性线称为零线。根据国标 GB 4728.11—85，三根相线和中线分别用符号 L_1、L_2、L_3 和 N 表示，如图 6-3（b）所示。有时为了简便，常把图 6-3（a）画成图 6-3（b）的形式。



（a）　　（b）

图 6-3　星形连接的三相四线制

由三根相线和一根中性线所组成的输电方式称为三相四线制（通常在低压配电中采用）；只有三根相线所组成的输电方式称为三相三线制（通常在高压输电工程或三相电动机供电中采用）。

每相绕组始端与末端之间的电压（即相线与中性线之间的电压）称为相电压，用相量 $\dot{U}_U$、$\dot{V}_V$、或符号 U_P 表示。相电压的参考方向规定为从始端指向末端。因为 3 个电动势的最大值相等，频率相同，相位互差 120°，所以 3 个相电压的最大值也相等，频率也相同，相互之间的相位差也均为 120°，即三相电压是对称的。

任意两相始端之间的电压（即相线与相线之间的电压）称为线电压，用相量 $\dot{U}_{UV}$、$\dot{U}_{UW}$、$\dot{U}_{WU}$ 或符号 U_L 表示。规定线电压的参考方向是自第一个下标指向第二个下标，如 $\dot{U}_{UV}$ 的方向为自 U 相指向 V 相。下面我们来分析三相电源绕组接成星形时的线电压与相电压的关系。

根据基尔霍夫电压定律可知：

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_{UV}&=\dot{U}_U-\dot{U}_V\\ \dot{U}_{VW}&=\dot{U}_V-\dot{U}_W\\ \dot{U}_{WU}&=\dot{U}_W-\dot{U}_U\end{aligned}\right\}\tag{6-3}$$

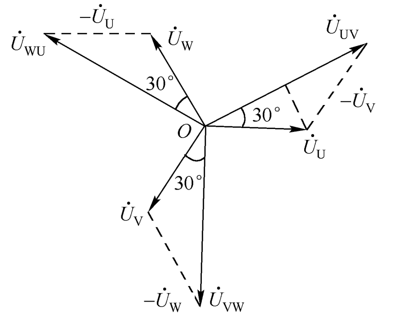


图 6-4　三相电源星形连接时的电压相量图

做出相电压的相量图，然后根据相量$\dot{U}_U$、$\dot{U}_V$、$\dot{U}_W$，依据式（6-3）分别作出线电压的相量$\dot{U}_{UV}$ $\dot{U}_{VW}$、$\dot{U}_{WU}$，如图 6-4 所示。从图中可以看出：线电压的有效值是相电压的有效值的$\sqrt{3}$倍，即 $U_L=\sqrt{3}U_P$；在相位上线电压超前对应的相电压 30°；当相电压对称时，线电压也对称。在低压配电系统中，利用这个特点，通过三相四线制线路可以提供两种电压。照明、家用电器等民用所需要的 220V 电压，是取自三相供电线路的相电压。而对于三相电动机，则可根据需要取用三相电源的线电压，$U_{线}=\sqrt{3}\times 220V=380V$。

注意：通常所说的高压电路的电压值，一般是指线路的线电压。如 10kV 线路，其线路的线电压为 10kV。

2．电源的三角形连接

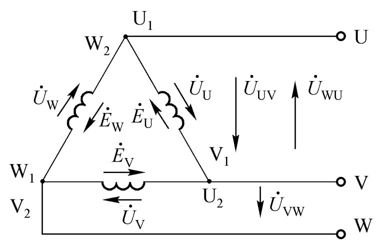


图 6-5　电源绕组的三角形连接

将发电动机一相绕组的末端与相邻的另一相绕组的始端依次相连，然后由 3 个连接点引出 3 根导线向外供电，这种连接方法就称为三相电源的三角形连接，用符号△表示，如图 6-5 所示。

由图 6-5 可以看出，三相发电动机绕组做三角形连接时，线电压就是相电压，即：

$$U_L=U_P \tag{6-4}$$

若三相电动势为对称三相正弦电动势，则根据基尔霍夫电压定律可知，三角形闭合回路的总电动势等于零，即：

$$e_U+e_V+e_W=0 \tag{6-5}$$

$$\dot{E}=\dot{E}_U+\dot{E}_V+\dot{E}_W=0 \tag{6-6}$$

由式（6-6）可以看出，发电动机三相绕组接成三角形，要求三相电动势绝对对称，绕组回路不得产生环流，否则就将烧毁发电动机，这是不易做到的，所以实际上三相发电动机绕组一般不采用三角形连接，但供电系统中的三相变压器绕组有时采用三角形连接。

6.2　三相负载的连接

接在三相电源上的负载统称为三相负载。三相负载由三部分组成，每一部分称为一相负载。三相负载可以是一个整体，如三相电动机；也可以是独立的三个单相负载，如日光灯、单相电动机以及多种家用电器等。

在三相负载中，如果每相负载的阻抗相等，如三相电动机、大功率三相电炉等，这样的负载称为三相对称负载，否则，称为三相不对称负载，如三相照明电路中的负载。在三相电路中，负载的连接方式也有两种：星形连接和三角形连接。

6.2.1　三相负载的星形连接

如果把三相负载的一端连接在一起接到电源的中性线上，三相负载的另外一端分别接到三相电源的三根相线上，就构成了三相负载的星形（Y）连接，如图 6-6（a）所示。

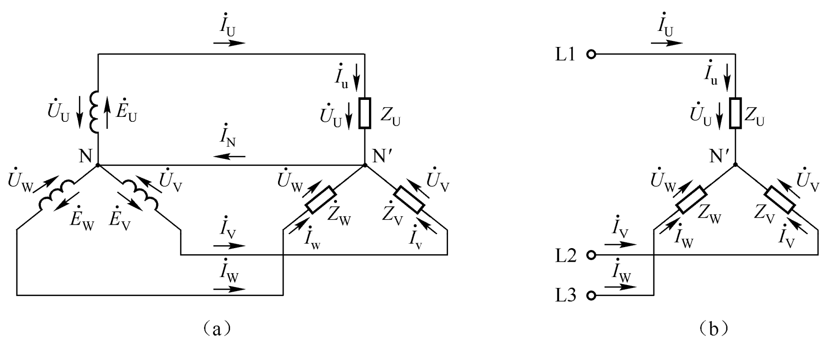


图 6-6　三相负载的星形连接

从图 6-6 中可以看出，若略去输电线上的电压降，则各相负载的相电压（即各相负载两端的电压）就等于电源的相电压。因此，三相负载作星形连接时，电源的线电压等于负载相电压的$\sqrt{3}$倍，即

$$U_{YL}=\sqrt{3}U_{YP} \tag{6-7}$$

在三相电路中，流过每根相线的电流称为线电流，用符号 I_U、I_V、I_W 表示，统称为 I_L，其方向规定为电流流向负载；把流过每相负载的电流称为相电流，用符号 I_u、I_v、I_w 表示，统称为 I_P，其方向与相电压方向一致；流过中性线的电流称为中线电流，用符号 I_N 表示，其方向规定为负载的中点流向电源的中点。由图 6-6（a）可以看出，三相负载作星形连接时，电源的线电流等于负载相电流，即

$$I_{YL}=I_{YP} \tag{6-8}$$

对于三相电路中的每一相负载来说，它就是一个单相电路，假设某相负载的阻抗为 Z_P，则根据第 5 章所学的知识可知：

$$I_P=\frac{U_P}{Z_P} \tag{6-9}$$

由图 6-6（a），根据基尔霍夫电流定律，可得

$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W \tag{6-10}$$

在三相对称电路中，由于各负载的阻抗相等，由式（6-9）可知，流过各相负载的电流大小也应该相等，而且每相负载间的相位差仍为 120°，其相量图如图 6-7 所示。

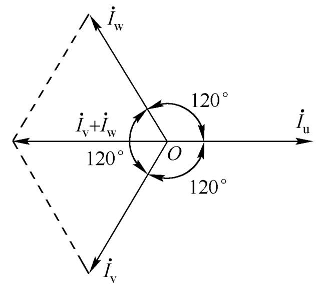


图 6-7　三相对称负载的三相电流相量图

由图可知，$\dot{I}_N = \dot{I}_u + \dot{I}_v + \dot{I}_w = 0$。即当三相负载对称时，中线电流为零，因此取消中线也不会影响三相电路的工作，这时三相四线制实际上就变成了三相三线制了，如图 6-6（b）所示。通常在高压输电时，由于三相负载都是对称的三相变压器，所以采用三相三线制供电；工厂中广泛使用的三相交流电动机、三相电炉等对称负载，也采用三相三线制供电。

当三相负载不对称时，各相电流的大小就不相等，相位差也不一定是 120°了，因此，中线电流就不等于零，此时中线绝不能断开，必须采用三相四线制供电。

有中线时，即使三相负载不对称，三相负载仍然工作在三相对称电压之下；而无中线时，不对称的各相负载上的电压情况变得复杂了，不再等于电源的相电压。经计算和实际测量都证明，阻抗大的负载上的电压也大，而阻抗小的负载上的电压也小。若某相负载承受高于其额定电压很多的电压值，则造成该相负载烧坏；而某一相负载承受的电压低于其额定电压，则该相负载不能正常工作。居民区众多用户电器同时烧坏，很多时候就是由于三相四线制中的中线出现问题的缘故。

综合上述：三相四线制中的中线的作用是使星形连接的三相不对称负载的相电压保持相等。在三相四线制中，规定中性线上不允许安装开关和熔断器，有时中性线还采用钢芯导线来加强其机械强度，以免断开。另一方面，在连接三相负载时，应尽量使其平衡，以减小中线电流。例如，在三相照明电路中，就应将照明的电灯平均分接在三相上，而不要全部集中接在某一相上或两相上。

【例 6-1】星形连接的三相异步电动机接在线电压为 380V 的三相电源上，若三相异步电动机每相负载的电阻为 30Ω，感抗为 40Ω，求负载的相电压、相电流和线电流。

已知：$U_{YL}=380\text{V}$，$R=30\Omega$，$X_L=40\Omega$。求：U_{YP}、I_{YL}、I_{YP}。

【解】由 $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$，可知

$$Z_P=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{30^2+40^2}=50\ (\Omega)$$

因为在星形连接的三相负载中：$U_{YL}=\sqrt{3}U_{YP}$、$I_{YL}=I_{YP}$

所以
$$U_{YP}=\frac{U_{YL}}{\sqrt{3}}=\frac{380}{\sqrt{3}}=220\ (\text{V})$$

由 $I_P=\frac{U_P}{Z_P}$得，

$$I_{YL}=I_{YP}=\frac{U_{YP}}{Z_P}=\frac{220}{50}=4.4\ (\text{A})$$

6.2.2 三相对称负载的三角形连接

三相对称负载依次连接，形成闭合回路，并将 3 个连接点分别与三相电源的三根相线连接的方式，称为

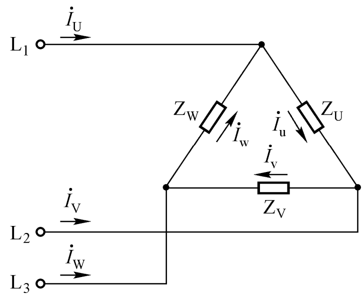


图 6-8　三相负载的三角形连接

三相负载的三角形（△）连接，如图 6-8 所示。三相负载三角形连接时，线电压、相电压、线电流、相电流的定义和正方向的规定与星形连接时相同。

从图中可以看出，三相负载作为三角形连接时，电源的线电压等于负载的相电压，即

$$U_{\triangle L}=U_{\triangle P} \tag{6-11}$$

线电流与相电流之间的关系可根据基尔霍夫电流定律，通过做出相量图得出，具体作图步骤如下。

（1）首先以 U 相为基准相量，分别做出三相相电流的相量 $\dot{I}_u$、$\dot{I}_v$、$\dot{I}_w$。

（2）根据基尔霍夫电流定律，在三角形的 3 个节点上，可写出线电流与相电流的相量关系为：

$$\dot{I}_U=\dot{I}_u-\dot{I}_w=\dot{I}_u+(-\dot{I}_w)$$

$$\dot{I}_V=\dot{I}_v-\dot{I}_u=\dot{I}_v+(-\dot{I}_u)$$

$$\dot{I}_W=\dot{I}_w-\dot{I}_v=\dot{I}_w+(-\dot{I}_v)$$

利用平行四边形法则，分别做出线电流的相量 $\dot{I}_U$、$\dot{I}_V$、$\dot{I}_W$，相量图如图 6-9 所示。

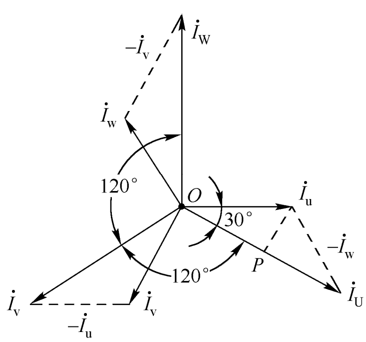


图 6-9　三相对称负载做三角形连接时线电流和相电流的相量图

由相量图可以看出：当三相相电流对称时，其三相线电流也是对称的（即大小相等、频率相同、相位互差 120°），并且线电流的相位总是滞后与之对应的相电流 30°。

由相量图还可以看出

$$\cos 30° = \frac{\frac{1}{2}I_U}{I_u}$$

$$I_U = \sqrt{3} I_u$$

也就是说，当对称三相负载做三角形连接时，线电流在数量上等于相电流的$\sqrt{3}$倍。即

$$I_{\triangle L} = \sqrt{3} I_{\triangle P} \tag{6-12}$$

由前面讨论可知：三相负载既可以做星形连接，也可以做三角形连接。具体如何连接，应根据负载的额定电压和电源电压的数值而定，务必使每相负载所承受的电压等于其额定电压。例如，对线电压为 380V 的三相电源来说，当每相负载的额定电压为 220V 时，该三相负载应接成星形；当每相负载的额定电压为 380V 时，该三相负载应接成三角形。

6.3　三相负载功率的计算*

在三相电路中，设三相负载的相电压分别为 U_U、U_V、U_W，相电流分别为 I_u、I_v、I_w，各相的功率因数分别为 $\cos\varphi_u$、$\cos\varphi_v$、$\cos\varphi_w$，则各相负载的有功功率为

$$P_U = I_u U_U \cos\varphi_u$$

$$P_V = I_v U_V \cos\varphi_v$$

$$P_W = I_w U_W \cos\varphi_w$$

三相负载总的有功功率为

$$P = P_U + P_V + P_W = I_u U_U \cos\varphi_u + I_v U_V \cos\varphi_v + I_w U_W \cos\varphi_w$$

在对称三相电路中，无论负载是星形连接还是三角形连接，由于各相负载阻抗相等、各相电压大小相等、各相电流也相等，所以三相功率为

$$P = P_U + P_V + P_W = 3P_U = 3I_P U_P \cos\varphi = \sqrt{3} I_L U_L \cos\varphi \tag{6-13}$$

其中 φ 为三相对称负载中任意一相中的相电压与相电流之间的相位差, $\cos\varphi$ 称为三相对称负载的功率因数。

注意：式（6-13）中的 φ 为负载相电压与相电流之间的相位差，而不是线电压与线电流之间的相位差。另外，负载做三角形连接时的线电流和线电压并不等于其作星形连接时的线电流和线电压。

同理，对称三相电路的无功功率为

$$Q = 3I_P U_P \sin\varphi = \sqrt{3} I_L U_L \sin\varphi \tag{6-14}$$

对称三相电路的视在功率为

$$S = 3I_P U_P = \sqrt{3} I_L U_L \tag{6-15}$$

【例 6-2】有一个三相对称负载，每相负载的电阻为 3Ω，电抗为 4Ω，接到线电压为 380V 的三相电源中，试分别计算该负载作星形连接和作三角形连接时的相电流、线电流及有功功率，并进行比较。

已知：$U_L=380V$，$R=3\Omega$，$X=4\Omega$。求：I_{YP}、I_{YL}、$I_{\Delta P}$、$I_{\Delta L}$、P_Y、P_Δ。

【解】由 $Z=\sqrt{R^2+X^2}$可知

$$Z_P=\sqrt{R^2+X^2}=\sqrt{3^2+4^2}=5\ (\Omega)$$

由 $\cos\varphi=\dfrac{R}{Z}$，得

$$\cos\varphi=\frac{3}{5}=0.6$$

（1）负载作星形连接时

由 $U_{YL}=\sqrt{3}U_{YP}$，可知

$$U_{YP}=\frac{U_L}{\sqrt{3}}=\frac{380}{\sqrt{3}}\approx 220\ (V)$$

则由 $I_P=\dfrac{U_P}{Z_P}$，得

$$I_{YP}=\frac{220}{5}=44\ (A)\ =I_{YL}$$

由 $P=3I_PU_P\cos\varphi$，得

$$P_Y=3\times 44\times 220\times 0.6=17424\ (W)$$

（2）负载作三角形连接时

由 $U_{\triangle L}=U_{\triangle P}$，得

$$U_{\triangle P}=U_L=380V$$

由 $I_P=\dfrac{U_P}{Z_P}$，得

$$I_{\triangle P}=\frac{380}{5}=76\ (A)$$

由 $I_{\triangle L}=\sqrt{3}I_{\triangle P}$，可知

$$I_{\triangle L}=\sqrt{3}\times 76\approx 132\ (A)$$

由 $P=\sqrt{3}I_LU_L\cos\varphi$，得

$$P_\triangle=\sqrt{3}\times 132\times 380\times 0.6\approx 52126\ (W)$$

（3）两种连接方式的比较

$$\frac{I_{\triangle P}}{I_{YP}}=\frac{76}{44}\approx\sqrt{3}$$

$$\frac{I_{\triangle L}}{I_{YL}}=\frac{132}{44}=3$$

$$\frac{P_\triangle}{P_Y}=\frac{52126}{17424}\approx 3$$

由以上例题可知，在相同的线电压下，三相负载作三角形连接的有功功率是作星形连接的有功功率的 3 倍，这是因为负载作三角形连接时的线电流是作星形连接时的线电流的 3 倍。对于无功功率和视在功率也有同样的结论。

6.4 技能训练 7 三相电路的测量

6.4.1 技能训练目标

（1）掌握三相负载的星形连接和三角形连接的方法。
（2）验证对称三相负载作星形连接时线电压与相电压、线电流与相电流之间的关系。
（3）验证对称三相负载作三角形连接时线电压与相电压、线电流与相电流之间的关系。
（4）了解连接中线的作用。

6.4.2 技能训练仪器和器件

（1）电工装配工具套件。
（2）三相调压器（0～380V）。
（3）三相负载灯板（40W×9）。
（4）万用表；交流电流表；三相开关；单相开关；连接导线。

6.4.3 技能训练内容和步骤

1．负载作星形连接的对称三相电路测量

（1）按实验图 6-10 所示将负载连接成星形。

（2）合上电源开关 SA1 和中线开关 SA2，测量三相负载对称（每相开 3 盏灯）时的线电压、相电压、线电流和相电流，同时观察灯光亮度是否正常，将测量结果记录于表 6-1 中。

（3）断开中线开关 SA2（每相仍开 3 盏灯），观察各灯光亮度有何变化？并测量线电压、相电压、线电流和相电流，将测量结果记录于表 6-1 中。

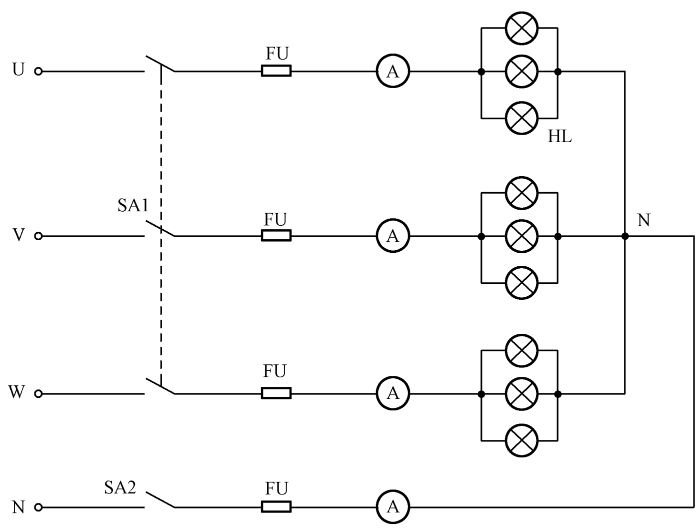


图 6-10 星形连接负载的试验电路

2．负载做三角形连接的对称三相电路测量

（1）按实验图 6-11 所示将负载连接成三角形。

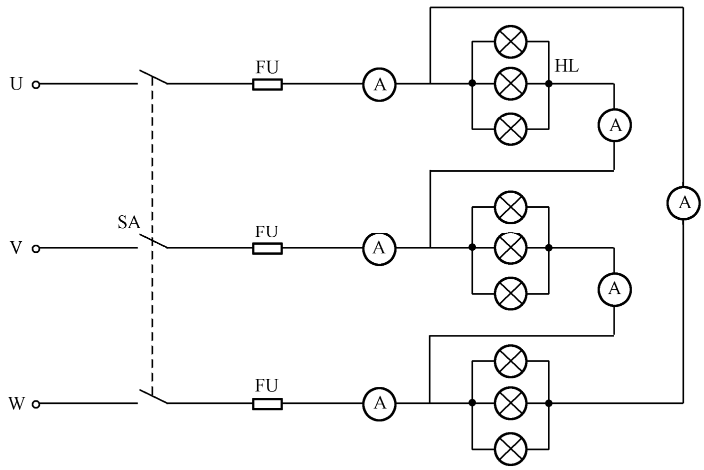


图 6-11　三角形连接负载的试验电路

（2）合上电源开关 SA，测量三相负载对称时的线电压、相电压、线电流和相电流，同时观察灯光亮度是否正常，将测量结果记录于表 6-1 中。

表 6-1　三相电路的测量值

序号	内　容		I_U	I_V	I_W	I_N	I_{UV}	I_{VW}	I_{WU}	U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}
1	负载星形连接	有中线										
2		无中线										
3	负载三角形连接											

3．不对称三相负载时的三相电路测量

（1）按图 6-12 所示连接电路，在有中线或者无中线时测量所有的线电压（流）值和相电压（流）值并分析，将测量结果记录于表 6-2 中。

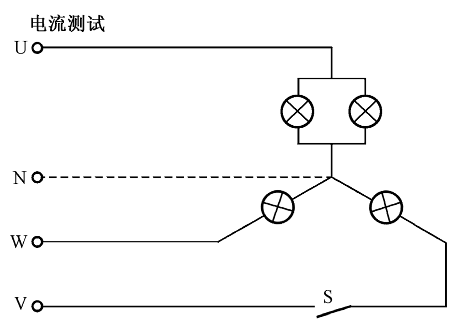


图 6-12　不对称三相负载的试验电路

（2）在有中线或者无中线时，分别断开 V 线（断开开关 S），再在有中线或者无中线时测量所有的线电压（流）值和相电压（流）值并分析，将测量结果记录于表 6-2 中。

表 6-2　不对称三相电路的测量

序号	内　容		I_U	I_V	I_W	I_N	I_{UV}	I_{VW}	I_{WU}	U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}
1	负载星形连接	有中线										
2		无中线										

6.4.4 注意事项

（1）线路接好检查无误后，教师在场并同意后方可接通电源。
（2）在做实验时应注意安全，不得触碰带电体。
（3）测量电压和电路读数时应注意选择合适的量程。

6.4.5 创新能力的启发和培养

（1）试验测量不对称三相负载三角形连接时的电压和电流。
提示：试将负载灯泡连接成三角形后，再分别测量电压和电流。
（2）考虑怎样测量三相功率。
提示：有功功率的测量方法可参照单相交流电路的测量，无功功率的测量可参阅有关资料。

6.4.6 思考问题

（1）负载在星形连接时中线起什么作用？什么情况下可不接中线？什么情况下必须接中线？
（2）负载对称或不对称时连接成三角形时，测量的电压和电流会有怎样的变化？
（3）功率表在三相电路中如何测量功率？

6.4.7 实训要求

（1）按实训内容连接电路、测量数据并记录。
（2）整理和分析测量的数据，理解三相供电的意义。
（3）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 6

1. 三相对称正弦交流电路是怎样定义的？
2. 三相电路的星形和三角形接法有哪些不同？
3. 一般三相四线制中的中线为什么采用比较细的导线？
4. 三相四线制中的中线为什么不允许安装熔断器或者断路器？
5. 三相电路的有功功率和无功功率是怎样测量的？

教学微视频

扫一扫

第 7 章　用电技术

【本章学习目标】

1. 了解发电、输电和配电过程，了解电力供电的主要方式和特点，了解供配电系统的基本组成。

2. 了解节约用电的方法，树立节约能源意识。

3. 了解保护接地、保护接零的方法和漏电保护器的使用。

【教学目标】

1. 知识目标：理解保护接地、保护接零和漏电保护器的工作原理与使用方法。

2. 能力目标：通过技能训练掌握漏电保护器的安装方法与要求。

【教学重点】

保护接地、保护接零及漏电保护器等的原理。

【教学难点】

漏电保护器的安装。

【教学方法】

讲授法、演示法、实验法。

7.1　电力供电与节约用电

电能与其他形式的能量相比，具有易于产生、传输、分配、控制和测量等优点，因此，在现代生活中，电能在工农业生产和人们的日常生活中占有极为重要的地位。而电能的产生到电力的应用，都包含着一系列的变换、传输、保护和控制过程。

7.1.1　电力系统概述

电力工业发展初期，电能是直接在用户附近的发电站（或称发电厂）中生产的，各发电站孤立运行。随着工农业生产和城市的发展，电能的需要量迅速增加，而热能资源（如煤田）和水能资源丰富的地区又往往远离用电比较集中的城市和工矿区，为了解决这个矛盾，就需要在动力资源丰富的地区建立大型发电站，然后将电能远距离输送给电力用户。同时，为了提高供电可靠性以及资源利用的综合经济性，又把许多分散的各种形式的发电站，通过送电线路和变电所联系起来。这种由发电厂、电力网和用户组成的整体系统，即称为电力系统。如图 7-1 所示是电力系统示意图。

在电力系统中，由升压和降压变电所和各种不同电压等级的送电线路连接在一起的部分，称为电力网，简称电网。

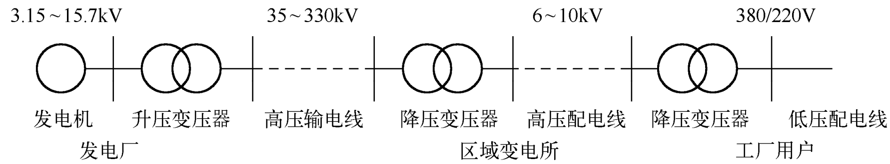


图 7-1　电力系统示意图

发电厂所生产的电能，除厂用电和直配线外，大部分由升压变压器升压后，再经高压线路输送给负荷中心。电压越高，输送的容量就越大，输送的距离也越远。目前我国远距离输电电压有 3kV、6kV、10kV、35kV、63kV、110kV、220kV、330kV、500kV、750kV 十个等级，国家电网公司正在实验 1000kV 特高压交流输电。随着电力电子技术的发展，超高压远距离输电也已开始采用直流输电方式，其方法是将发电厂发出的三相交流电整流为直流电，然后远距离输送至终端后，再由电力电子器件将直流电逆变为三相交流电，供用户使用。如：我国长江葛洲坝水电站的强大电力就是通过直流输电方式送到华东地区的。

10kV 及其以下的电力线路称为配电线路。将额定电压为 1kV 以上的电力线路称为“高压线路”，额定电压在 1kV 以下的电力线路称为“低压线路”。

电能输送到厂矿企业后，经企业总降压变电所降压，通过配电线路输送到各用电设备。根据用电设备对供电可靠性的要求，将电力负荷分为三个等级。

- 一级负荷：供电中断将造成人身伤亡危险，或将造成重大政治影响，或重大设备损坏且难以修复，将给国民经济带来重大损失以及造成公共场所秩序严重混乱等。
- 二级负荷：停止供电会造成产品的大量减产、大量原材料报废，或将发生重大设备损坏事故，交通运输停顿，公共场所的正常秩序造成混乱等。
- 三级负荷：所有不属于一级及二级负荷的用电设备。

对于一级负荷应有两个独立电源供电，以保证不停电。对于二级负荷，为了尽可能保证供电可靠，应由双回线路供电，当取得双回线路有困难时，允许由一回专用线路供电。对于三级负荷的供电方式，无特殊要求。由于供电中断影响较小，可以不设置备用电源，但应在不增加投资的情况下，尽力提高供电的可靠性。

7.1.2 计划用电与节约用电

电能的生产与其他产品的生产不同。电能不能大量储存，瞬间生产的电能必须同一瞬间使用，即发电、供电、用电 3 个环节只能共同存在、共同发生作用。因此，搞好计划用电是电力工业经营管理部门保证电能安全生产和向用电单位正常供电的工作内容之一。要做到安全、经济、合理用电，以提高社会和电业本身的经济效益。

从我国能源消耗的情况来看，70%以上的能源消耗在工业部门。因此，计划用电的重点应放在工业。具体方法如下。

（1）建立协调有序的供电用电秩序。

（2）生产、经营单位实行避峰错峰用电和轮休用电措施。

（3）严格控制高耗能电器的使用。

（4）加强能源管理和节能降耗工作。

我国是能源消费大国，节约能源是我国经济和社会发展的一项长远战略方针。节约用电，就是要不断提高电能利用技术水平，不白白浪费电能，让每度的电能都发挥出最大的作用。

企业节约用电有以下主要途径。

（1）加强工厂供用电系统和科学管理。

（2）提高用电设备效率。

① 采用新技术和新材料，如采用红外加热技术、硅酸铝纤维保温、采用节能照明灯等；

② 对用电设备进行技术改造，逐步更新淘汰现有低效率的供用电设备；

③ 改造现有工厂供配电系统，降低线损。

（3）合理使用现有设备，提高自然功率因数。

（4）采用无功功率补偿装置，人为地提高设备的功率因数。

7.2 用电保护

由于电气设备的绝缘损坏或安装不合理等原因出现金属外壳带电的故障称为漏电。设备漏电时，会使接触设备的人体发生触电，还可能会导致设备的烧毁、电路短路等事故，必须采取一定的防范措施以确保安全。

7.2.1 保护接地

在电源中性点不接地的供电系统中，将电气设备的金属外壳与接地体（埋入地下并直接与大地接触的金属导体）可靠连接，这种方法称为保护接地。通常接地体为钢管或角铁，接地电阻不允许超过 4Ω，当变压器容量在 100kVA 以下时，接地电阻可小于 10Ω。

图 7-2 为保护接地原理图。当设备漏电，人体触及漏电设备时，相当于人体（电阻为 R_b）与接地体（电阻为 R_e）并联。由于人体电阻远远大于接地电阻（电阻为 $R_b \gg R_e$），所以，漏电电流将经过接地体电阻 R_e 和线路漏电阻 R_1 形成回路，导致通过人体的电流非常微小。接地体电阻越小，人体承受的电压也越小，越安全。

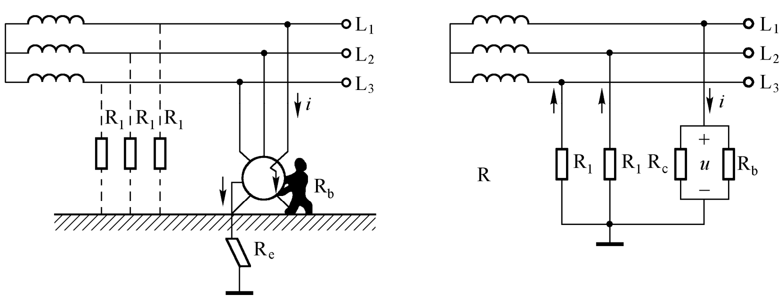


图 7-2 保护接地原理图

7.2.2 保护接零

在电源中性点已接地的三相四线制供电系统中，将电气设备的金属外壳与电源零线相连，这种方法称为保护接零，如图 7-3 所示。

当设备的金属外壳接电源零线之后，若设备某相发生外壳漏电故障，就会通过设备外壳形成相线与零线的单相短路，其短路电流足以使该相熔断器熔断，从而切断了故障设备的电源，确保了安全。

当采用保护接零时，电源零线绝不允许断开，否则保护失效。因此，除了电源零线上不允许安装开关、熔断器外，在实际应用中，用户端往往将电源零线再重复接地，以防零线断开。重复接地电阻一般小于 10Ω。

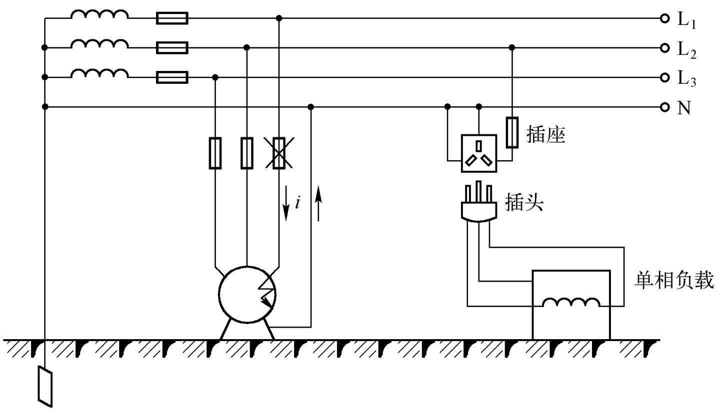


图 7-3　保护接零原理图

对于单相用电设备，一般采用三脚插头和三眼插座，其中一个孔为接零保护线，对应的插头上的插脚稍长于另外两个电源插脚。

7.2.3 漏电保护器

漏电保护器的作用一是在电气设备（或线路）发生漏电或接地故障时，能在人尚未触及之前就把电源切断；二是当人体触及带电体时，能在 0.1s 内切断电源，从而减轻电流对人体的伤害程度。

在技术上，漏电保护器用以对低压电网直接触电和间接触电进行有效保护，也可作为三相电动机的缺相保护。它有单相的，也有三相的。

根据工作原理可分为电压型、电流型和脉动型三种类型，目前应用广泛的是电流型漏电保护器。

电子式电流型漏电保护器的保护原理是：当发生漏电故障或触电事故时，电流继电器将漏（触）电信号传给电子放大器，经放大后再给漏电脱扣器，使主开关断开，切断故障电路，以达到保护作用，如图 7-4 所示。

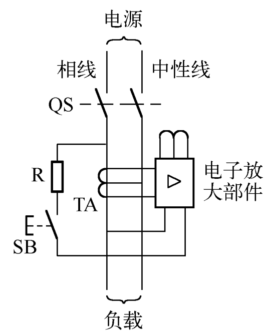


图 7-4　漏电保护器原理图

7.3 技能训练 8　漏电保护器的安装

7.3.1 技能训练目标

（1）了解漏电保护器的结构和工作原理。
（2）学习漏电保护器额定漏电动作电流的选择。
（3）了解漏电保护器的接线方式。
（4）学习单相漏电保护器的接线。

7.3.2 技能训练仪器与器件

漏电保护器（漏电保护开关）是一种电气安全装置。将漏电保护器安装在低压电路中，当发生漏电和触电且达到保护器所限定的动作电流值时，就立即在限定的时间内动作，自动断开

电源进行保护。

漏电保护器的选用原则如下。

1．按保护目的选用

（1）以防止人身触电为目的，安装在线路末端，选用高灵敏度，快速型漏电保护器。

（2）以防止触电为目的，并且与设备接地并用的分支线路，选用中灵敏度、快速型漏电保护器。

（3）用以防止由漏电引起的火灾和保护线路、设备为目的的干线，应选用中灵敏度、延时型漏电保护器。

2．按供电方式选用

（1）保护单相线路（设备）时，选用单极二线或二极漏电保护器。

（2）保护三相线路（设备）时，选用三极漏电保护器。

（3）既有三相又有单相时，选用三极四线或四极漏电保护器。在选定漏电保护器的极数时，必须与被保护线路的线数相匹配。保护器的极数是指内部开关触头能断开导线的根数，如三极保护器，是指开关触头可以断开三根导线。而单极二线、二极三线、三极四线的保护器，均有一根直接穿过漏电检测元器件而不断开的中性线，在保护器外壳接线端子标有符号“ N ”，表示连接工作零线，此端子严禁与 PE 线连接。但应注意，不宜将三极漏电保护器用于单相二线（或单相三线）的用电设备。也不宜将四极漏电保护器用于三相三线的用电设备。更不允许用三相三极漏电保护器代替三相四极漏电保护器。

3．适用范围

ZS108L1—32 漏电保护器（见图 7-5）适用于交流 220V，频率 50Hz，额定电流 32A 及以下的单相电源中性点直接接地的供电系统中，主要用于对人身触电提供间接接触保护。也可用于防止设备绝缘损坏，产生接地故障电流而引起的火灾危险。该断路器的派生产品还具有过载、过压保护功能，可有效地防止因超负荷过电流或电网电压过高而损坏用电设备。与 RL 系列熔断器串联使用时，可作短路保护，具有跳闸报警功能。

根据漏电保护器保护目的确定额定漏电流和动作电流：若用于人身保护，应选 30mA 或 30mA 以下的保护器；若在地下、高空、水下或金属容器内，或该用电设备为医疗器械等特殊应用场合，应选 15mA 或 10mA 的漏电保护器；若保护的是保安防火，可选用 50mA、75mA、100mA 的漏电保护器，其动作电流的数值主要根据被保护线路的长短来确定。



图 7-5　漏电保护器的外形图

通常规定漏电保护器的额定漏电不动作电流是额定漏电动作电流的 0.5 倍。确定此技术指标的目的是保证负载在正常漏电电流的情况下，不至于引起开关的误动作。

4．家用漏电保护器的结构与工作原理

家用漏电保护器是一种电子脱扣型单相漏电自动开关，为电流动作型电子式快速漏电保护器，主要由断路开关和零序电流互感器、电子放大组件、漏电脱扣器、试验装置及指示组成（见图 7-6）。

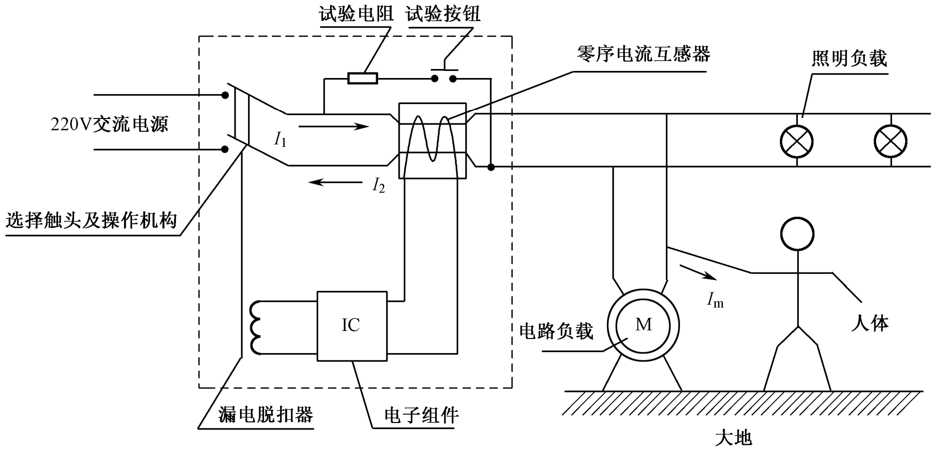


图 7-6　漏电保护器原理图

家用漏电保护器内装有一个能检测漏电电流的检测元器件（零序电流互感器），在正常运行时穿过互感器铁心窗孔中的两条导线通过的电流大小相等方向相反，互感器铁心中的合成磁通为零，互感器的二次侧绕组中没有感应电势输出，电子漏电脱扣器不动作，开关保持接通状态。

当发生用电器绝缘损坏或人体触电时，在负载的相线与“ 地 ”之间就产生漏电流，对原来的用电器负载电路形成分路，使互感器铁心窗孔的中线电流减少，造成相线与中线电流不相等，互感器的二次侧绕组感应出零序电势，经过电子放大电路后使脱扣器动作，开关立即断开。

线路中的试验电阻和试验按钮是用来检验漏电保护器动作可靠性的。当按下试验按钮时，试验电阻被跨接在负载相线与电源中线之间，形成一个模拟的漏电通路，产生一个模拟漏电流，使自动开关断开。

7.3.3　技能训练内容与步骤

（1）按图 7-7 所示漏电保护器实训接线图接线，出线端可以连接一个灯泡或者其他用电负载。

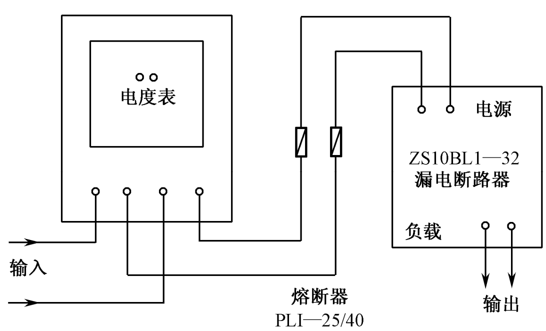


图 7-7　漏电保护器实训接线图

（2）校验漏电保护器是否能进行漏电保护。具体的试验方法：在输入端接入一个单相自耦调压器，调节其输出电压，测量并记录其值（填入表 7-1 中），同时按下漏电保护器面板上的动作按钮，试验其是否脱开漏电自动开关。

表 7-1　测试漏电保护器的动作电压值（V）

电压值	5	10	15	20	25	30
测量值						
是否动作						

（3）如有条件可安装三极漏电保护器，用于三相三线制供电电路（三相对称负载无中线）；安装四极漏电保护器，用于三相四线制供电电路（三相不对称负载）。了解安装电路。

（4）校验漏电保护器的动作灵敏度，即检验漏电电流多大时，漏电保护器能够动作保护。具体的试验方法：可在漏电保护器输出端的相线与地线之间串联 100kΩ 以上的滑线变阻器，同时串联交流电流表用于观测漏电保护器的动作漏电流值，调节滑线变阻器测量并记录漏电保护器的动作漏电流值及其切断电源的动作时间，填入表 7-2 中。

表 7-2　测试漏电保护器的动作漏电流值

序　　号	1	2	3	4	5	6
漏电流值（mA）						
动作时间（s）						

7.3.4 注意事项

（1）不要因为经常合闸麻烦、图省事而多次强行试送或者人为退出漏电保护器，而要请专业电工检查保护器频繁跳闸的原因，测量线路绝缘电阻值，有条件的还可测量变压器保护接地系统的接地电阻值，对线路或者漏电保护器进行整改、检修，力求漏电保护器正常动作。

（2）不要用漏电保护器替代刀闸，更不能用刀闸取代漏电保护器，最好是二者配合使用，并按照电源—电度表—双极漏电保护器—刀闸—用电设备的顺序规范装设。

（3）不要简单用 TA 按钮进行试跳检查，在安装前要由专门机构进行检验，安装时、使用中要在被保护线路上作接地试跳的现场检定或定期、不定期例行检查。

（4）应安装在无显著摇动、无冲击震动的地方；进线端与出线端不能接反，否则会烧毁断路器内部电子电路元器件。

7.3.5 创新能力的启发和培养

怎样测量漏电电流？

提示：可在负载端的相线与接地线之间连接开关、可变电阻和交流毫安电流表，通过调节电阻可实测动作的漏电电流值。

7.3.6 思考问题

（1）漏电保护器为什么能够起保护作用？

（2）为什么不能简单用漏电保护器替代刀闸？

（3）漏电保护器的输入端和输出端接错会产生什么影响？

7.3.7 实训要求

（1）按单相漏电保护器的连接电路进行接线，并且检验保护作用。

（2）分别测量和记录设置的漏电电流，观察和记录漏电保护器的灵敏度。

（3）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 7

1. 什么叫电力系统？什么叫电力网？
2. 目前我国远距离输电电压有哪几个等级？
3. 根据用电设备对供电可靠性的要求，将电力负荷分为哪几个等级？
4. 工业企业节约用电的主要途径有哪些？
5. 什么是保护接地？什么是保护接零？
6. 漏电保护器的作用是什么？

教学微视频

扫一扫

第 8 章　常用电器

【本章学习目标】

1. 了解常用的照明光源，掌握白炽灯照明电路和日光灯照明电路的组成及工作原理。
2. 了解变压器的基本结构、额定值及用途，理解变压器的工作原理。
3. 了解三相笼型交流异步电动机的基本结构、工作原理和铭牌含义。
4. 了解直流电动机的分类、基本结构、工作原理和使用方法。
5. 了解常用低压电器的结构、工作原理及应用场合，会根据工作场所合理选用。

【教学目标】

1. 知识目标：了解白炽灯照明电路和日光灯照明电路的组成及工作原理；了解变压器和电动机的基本结构及工作原理；掌握常用低压电器的符号，会根据工作场所合理选用。

2. 能力目标：通过理论知识的学习和应用，培养实际动手能力。

【教学重点】

白炽灯照明电路、日光灯照明电路、变压器、三相笼型交流异步电动机以及常用低压电器的基本结构和工作原理。

【教学难点】

变压器、三相笼型交流异步电动机的基本结构、工作原理。

【教学方法】

分析法、演示法、实验法、练习法。

8.1　常用照明灯具

8.1.1　照明的概念

1．电气照明

电气照明在工农业生产和日常生活中占有重要的地位。照明装置是由电光源、灯具、开关和控制电路等部分组成的。这样就构成了以照明负载为主要用电负载的电路，称之为照明电路；同样在照明电路中用来控制负载运行并进行电路保护的电器称之为照明电器。

电气照明的重要组成部分是电光源（即照明灯泡）和灯具。电光源按发光原理，可分为热辐射光源和气体放电光源两大类。热辐射光源是利用物体受热时辐射发光的原理制造的光源，如白炽灯、卤素灯（碘钨灯和溴碘钨灯）等；气体放电光源是通过气体放电时发光的原理制造的光源，如荧光灯、高压汞灯、高压钠灯和金属卤化物灯等。常用的照明灯具主要有白炽灯和荧光灯两大类。

2．照明的分类

根据实际需要，通常照明可分为以下三种。

（1）一般照明：无特殊要求、照度基本均匀分布的照明称为一般照明，如走廊、教室、办公室等均属于一般照明。

（2）局部照明：一般只局限于某工作部位、对光线有方向要求的照明，如机床、钳工台、写字台等工作台灯属于局部照明。

（3）混合照明：由一般照明和局部照明共同组成的照明称为混合照明，如对一般精工车间，既要求有对车间大面积均匀布光外，又要求有对生产机械进行照明，就需要混合照明。

电气照明应注意以下几点：

① 应使各种场合下的照度达到规定的标准。

② 空间亮度应合理分布。

③ 照明灯的实用，经济、安全，便于施工和维修，并使照明灯的光色、灯具外形结构与建筑物相协调。

3．照明灯具安装的一般要求

照明灯具按其配线方式、厂房结构、环境条件及照明要求的不同而有吸顶式、壁式、嵌入式和悬吊式等几种方式，不论采用何种方式，都必须遵守以下基本原则。

（1）灯具安装的高度，室外一般不低于 3m，室内一般不低于 2.5m，如遇特殊情况不能满足要求时，可改用安全电压供电。

（2）灯具安装应牢固，灯具质量超过 3kg 时，必须固定在预埋的吊钩上。

（3）灯具的悬吊管应由直径不小于 10mm 的电线管或水煤气管制成。

（4）灯具固定时，不应该因灯具的自重而使导线受力。

（5）灯架及管内的导线不允许有接头。

（6）导线的分支及连接处应便于检查。

（7）导线在引入灯具应有绝缘物保护，以免磨损导线的绝缘，也不应使其受到应力损伤。

（8）必须接地或接零的灯具外壳应有专门的接地螺栓和标志，并与地线或零线良好连接。

（9）相线和零线应严格区分，开关一律控制相线。安装螺口灯座时，相线一律接灯座中心接线端，不允许接错。

（10）单相双孔插座垂直排列时，上孔为相线，下孔为中性线；水平排列时，右孔是相线，左孔是中性线。单相三孔插座安装时，上孔为保护接地（或接零），右孔是相线，左孔是中性线。

注意：决不允许在插座内将保护接地孔与插座内引自电源的那根零线直接连接，因为一旦电源的零线断开，或者是电源的相线与零线接反时，其外壳等金属部分将带有与电源相同的电压，这就相当危险。

这种错误的接法非但不能保证故障情况下起到安全保护作用，相反在正常情况下却可能招致触电事故的发生。单相三孔插座安装的正确与错误接法如图 8-1 所示。

（11）室内照明开关一般安装在门边便于操作的位置，拉线开关一般应离地 2～3m，暗装翘板开关一般离地 1.3m，与门框的距离一般为 150～200mm。开关扳手往上时，电路接通；扳手向下时，电路断开。

（12）明装插座的安装高度一般应离地 1.4m，暗装插座一般应离地 300mm，同一场所暗装的插座高度应一致，其高度相差一般应不大于 5mm，多个插座成排安装时，其高度相差一般

应不大于 2mm。

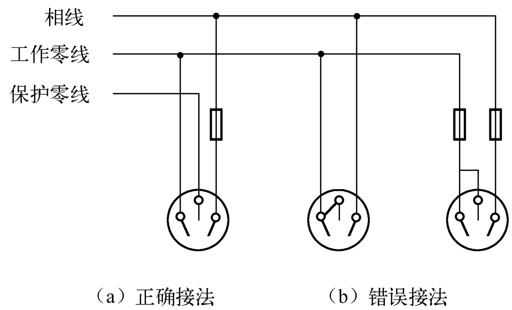


图 8-1　单相三孔插座接线方法

8.1.2 白炽灯照明电路

1．白炽灯的分类

白炽灯也称灯泡，是利用电流流过高熔点钨丝后，使之发热到白炽程度而发光的电光源。白炽灯泡分插口式和螺口式两种，其结构如图 8-2 所示。

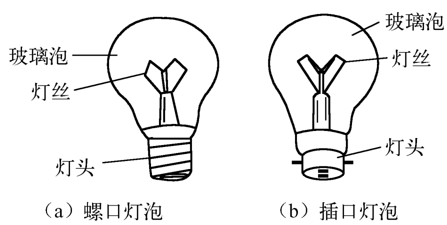


图 8-2　白炽灯

白炽灯的规格以功率标称，由 15～1500W 不等，其发光效率较低，寿命约为 1000h。

2．白炽灯的常用基本电路

白炽灯照明电路比较简单，只要将白炽灯与开关串联到电源上即可。照明电路电源一般都是来自供电系统的低压配电线路上的一根相线和一根零线（中性线），为 220V/50Hz 的正弦交流电，白炽灯的常用基本电路如图 8-3 所示。

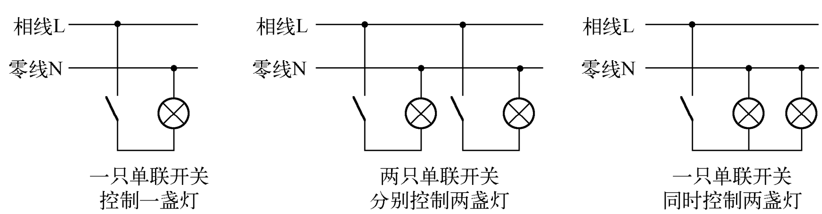
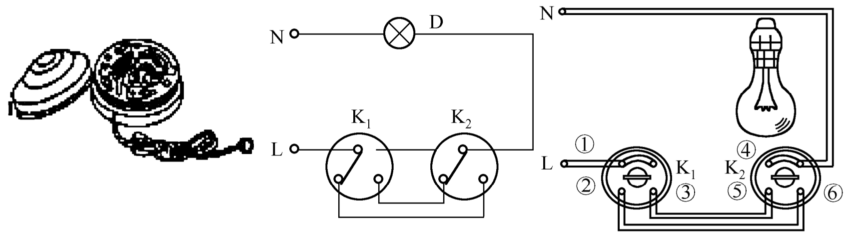


图 8-3　白炽灯的常用基本电路

安装白炽灯的关键是：灯座、开关要串联，相线进开关，零线（中性线）进灯座。

除以上常用照明电路外，还有两地开关控制一盏灯电路（或两盏灯），这种电路广泛应用于楼梯、走廊、家庭客厅或厨房，这个电路主要是两个双联开关控制一盏灯，其原理图和接线图如图 8-4 所示。



（a）双联开关　　（b）电路原理图　　（c）接线图

图 8-4　两地开关控制一盏灯电路

8.1.3 日光灯照明电路

1．日光灯照明电路的组成

日光灯又称荧光灯，是一种发光效率较高的气体放电光源，光色近似日光，是应用较为普遍的一种照明灯具。它具有照度大、耐用省电、光线散布均匀、灯管表面温度低、使用寿命是白炽灯的 3 倍左右等优点。它由灯管、启辉器、镇流器、灯架和灯座等组成，如图 8-5 所示。

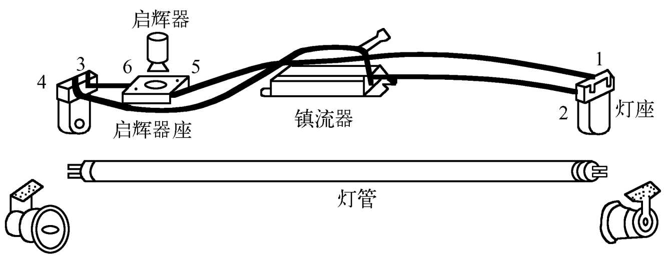


图 8-5　日光灯的组成

（1）灯管：灯管由玻璃管、灯丝、和灯头等组成，灯管内充有少量汞（水银）和惰性气体，管壁内涂有荧光粉。规格较多，常用的有 6W、8W、12W、15W、20W、30W、40W 等。常用的日光灯管的基本结构如图 8-6 所示。

（2）启辉器：又叫启动器、跳泡，由氖泡、小电容、出线脚和外壳构成。氖泡内装有动触片（U 形双金属片）和静触片。

（3）镇流器：主要由铁芯和电感线圈组成。主要作用有两个：一个是与启辉器配合使用来启动日光灯；另一个是在日光灯被点亮后限制灯管的电流。品种有开启式、半封闭式、封闭式三种。规格需与灯管瓦数配合使用。镇流器结构如图 8-7 所示。

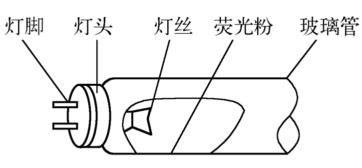
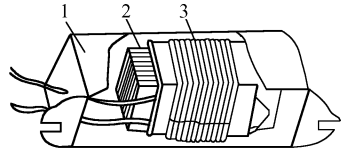


图 8-6　日光灯管的基本结构



1—外壳；2—铁芯；3—电感线圈

图 8-7　镇流器的结构

（4）灯架：有木制和铁制的两种。规格配合灯管长度选用。

（5）灯座：分弹簧式（插入式）和开启式两种。规格与灯架和灯管配合使用。

2．日光灯照明电路的工作原理

当日光灯接通电源后，电源电压经过镇流器、灯丝，加在启辉器的 U 形动触片和静触片之间，引起辉光放电。放电时产生的热量使双金属 U 形动触片膨胀并向外伸张与静触片接触，接通电路，使灯丝预热并发射电子。与此同时，由于 U 形动触片和静触片相接触，两片间电压为零而停止辉光放电，使 U 形动触片冷却，并复原而脱离静触片。在动触片断开瞬间，镇流器两端会产生一个比电源电压高得多的感应电动势，这个感应电动势加在灯管两端，使灯管内惰性气体被电离而引起弧光放电。随着弧光放电，灯管内温度升高，液态汞就气化游离，引起汞蒸气弧光放电而产生不可见的紫外线。此时紫外线激发灯管内壁的荧光粉后，发出近似日光色的灯光。

8.1.4 节能新型电光源及其应用

近几年来对照明的照度、光色、节能等各项指标的要求都在不断地发展和提高。现代电气照明技术的宗旨是既要获得理想的光环境，又要节约电能，也就是提高发光效率，开发体积小的高效节能光源，改善电光源的显色性，延长寿命。达到上述目的的具体途径是开发研制新型材料、采用新工艺以及进一步研究新的发光机理、开发新型电光源，而最为现实的途径则是改进现有电光源的制造技术，采用新型的、自动化性能好的生产设备。

城市道路、公共场所和工厂车间照明系统的电光源数量多、功率大、照明时间长，是实施照明节电的重点。下面从节能的角度看几种常用的电光源。

1．金属卤化物灯

金属卤化物灯的特点是寿命长、光效高、显色性好。主要用于工业照明、城市亮化工程照明、商业照明、体育场馆照明以及道路照明中。

2．陶瓷金属卤化物灯

陶瓷金属卤化物灯的性能优于一般金属卤化物灯，主要用于商场、橱窗、重点展示及商业街道照明中。

3．高频无极灯

高频无极灯的特点是超长寿命（40000～80000h）、无电极、瞬间启动和再启动、无频闪、显色性好。主要用于公共建筑、商店、隧道、步行街、高杆路灯、保安和安全照明及其他室外照明中。

4．发光二极管——LED

LED 是电致发光的固体半导体光源，其特点是高亮度点光源、可辐射各种色光和白光、0%～100%光输出（电子调光）、寿命长、耐冲击和防震动、无紫外（UV）和红外（IR）辐射、低电压下工作（安全）。主要用于交通信号灯、高速道路分界照明、道路护栏照明、汽车尾灯、出口和入口指示灯、桥体或建筑物轮廓照明及装饰照明中。

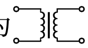
节能新型电光源的发明促进了电力装置的建设，电光源的转换效率高，电能供给稳定，控制和使用方便，安全可靠，并可方便地用仪表计数耗能，故在现代电气照明技术中，很快得到了普及，它不仅成为人们日常生活的必需品，而且在工业、农业、交通运输以及国防和科学研究中，都发挥着重要作用。

8.2 变压器

8.2.1 变压器的结构、分类与额定值

1．变压器的用途

变压器是一种将交流电压升高或降低，并且保持电源频率不变的静止电气设备。变压器的主要功能有：①变电压：如电力变压器；②变电流：如电流互感器；③变阻抗：如电子线路中阻抗匹配的输出变压器。

发电厂要把大量的电能输送到远处的用电地区，就必须用升压变压器把电压升高，以降低线路上的损耗；在用电地区，又必须用降压变压器把电压降低，以适应各种用电设备和安全用电的需要。此外，变压器还可以用来改变交流电流、变换阻抗和相位，所以变压器是输配电、电工测量和电子技术等方面不可缺少的重要电气设备。变压器的图形符号为，文字符号为“T”。

2．变压器的分类

变压器的种类很多，一般常用的分类可归纳如下。

1）按用途分类

（1）电力变压器：用于输配电系统的升压或降压，是一种最普通的常用变压器。

（2）仪表用变压器：如电压互感器、电流互感器，用于测量仪表和继电保护装置。

（3）特殊用途变压器：如冶炼用的电炉变压器、电解用的整流变压器、焊接用的电焊变压器等。

（4）控制和电源变压器：如用于电子线路和自动控制系统中的小功率电源变压器、控制变压器和脉冲变压器等。

2）按相数分类

（1）单相变压器：用于单相负荷和三相变压器组。

（2）三相变压器：用于三相系统的升降电压。

3）按绕组数分类

（1）自耦变压器：它的低压边绕组是高压边绕组的一部分，常用在电压变化不大的系统中。

（2）双绕组变压器：这是变压器绕组的基本形式，广泛应用于两个电压等级的电力系统中。

4）按铁芯形式分类

有芯式变压器和壳式变压器两种。

5）按冷却方式分类

（1）油浸式变压器：靠绝缘油进行冷却。

（2）干式变压器：依靠辐射和空气对流进行冷却，一般容量较小。

（3）充气式变压器：变压器的器身放在封闭的铁箱内，箱内充以绝缘性能好传递快、化学性能稳定的气体。

3．变压器的基本结构

变压器的种类很多，但基本结构相同。变压器的基本部件是铁芯和绕组，大型变压器还有油箱及其他附件，如图 8-8 所示。

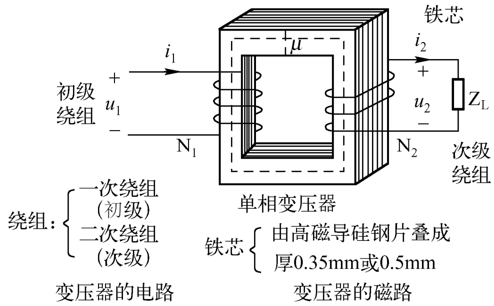


图 8-8　变压器的结构

1）变压器的铁芯

铁芯主要用于构成变压器的磁路和支撑变压器的绕组。铁芯分铁芯柱和铁轭两部分，铁芯柱上套装绕组，铁轭使整个磁路构成闭合回路。为了减少铁芯中的涡流损耗，铁芯一般用高磁导硅钢片叠成，分热轧和冷轧两种，其厚度为 0.35～0.5mm。硅钢片的两面涂以绝缘漆，以使片与片之间绝缘。

2）绕组

绕组在变压器中常称为线圈，是变压器的电路重要部分，一般用有绝缘的铜导线或铝导线绕制而成。按照高压绕组和低压绕组在铁芯柱上的安排方式，变压器的绕组分为同心式和交叠式两种。

（1）同心式绕组：同心式绕组的高、低压绕组同套在铁芯柱上，是为了便于调压和绝缘，通常低压绕组在里面，高压绕组在外面，高、低压绕组之间都留有一定的绝缘间隙，并以绝缘纸筒相互隔开。它又可分为圆筒式、连续式、螺旋式和线段式等。这种绕组结构简单，绕制方便，应用广泛。

（2）交叠式绕组：交叠式绕组把高、低压绕组互相交叠放置，为了减小绝缘距离，将低压绕组靠近上下铁轭，中间放置高压绕组。这种绕组由于高、低压绕组之间的间隙较多，绝缘复杂，故包扎很不方便。其优点是机械强度较高，主要应用在低压、大电流的电焊、电炉变压器中。

8.2.2　变压器工作原理

如图 8-9 所示是单相变压器原理图，为了分析方便，规定与一次侧（又称初级）有关的各量，在其符号的右下角均标注 1，如 e_1、u_1、U_1、I_1、N_1、P_1 等。

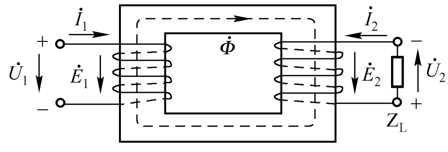


图 8-9　单相变压器的工作原理

规定与二次侧（又称次级）有关的各量，在其符号的右下角均标注 2，如 e_2、u_2、U_2、I_2、N_2、P_2 等。

当变压器一次侧接入交流电源后，在一次侧绕组中就有交流电流通过，于是在铁芯中产生交变磁通，称为主磁通。主磁通集中在铁芯中，极少一部分在绕组外闭合，称为漏磁通，为讨论问题方便可忽略不计。所以，可认为一次侧、二次侧绕组同受主磁通作用。根据电磁感应定律，一次侧、二次侧绕组都将产生感应电动势。如果二次侧接有负载构成闭合回路，就有感应

电流流过负载。

1．变压原理

设一次侧、二次侧绕组的匝数分别为 N_1、N_2。由于一次侧、二次侧绕组同受主磁通作用，所以在两个绕组中产生感应电动势 e_1、e_2 的频率与电源频率相同。若主磁通随时间的变化率为 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，则由电磁感应定律可得

$$e_1 = -N_1\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$e_2 = -N_2\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

又因感应电动势与感应电压反相，所以

$$U_1 = e_1 = -N_1\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$U_2 = e_2 = -N_2\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

如不考虑相位，只考虑它们的大小，则有效值之间的关系为

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=n \tag{8-1}$$

式中　U_1 ——一次侧交流电压的有效值；

U_2——二次侧交流电压的有效值；

N_1——一次侧绕组的匝数；

N_2——二次侧绕组的匝数；

n——一次侧、二次侧的电压比或匝数比，简称变比。

上式表明，变压器一次侧、二次侧绕组的电压比等于它们的匝数比 n。当 $n>1$ 时，$N_1>N_2$，$U_1>U_2$，这种变压器是降压变压器；当 $n<1$ 时，$N_1<N_2$，$U_1<U_2$，这种变压器是升压变压器。可见，只要选择变压器一次侧、二次侧绕组的电压比，就可实现升压或降压的目的。

2．变流原理

变压器在变压过程中只起能量传递的作用，无论变换后的电压是升高还是降低，电能都不会增加。根据能量守恒定律，在忽略损耗时，变压器的输出功率 P_2 应与变压器从电源中获得的功率 P_1 相等，即 $P_1 = P_2$。于是当变压器只有一个二次侧时，则关系是

$$I_1U_1 = I_2U_2 \quad 或 \quad \frac{I_1}{I_2}=\frac{U_2}{U_1}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{n} \tag{8-2}$$

上式说明，变压器工作时其一次侧、二次侧绕组的电流比与一次侧、二次侧绕组的电压比或匝数比成反比，而且一次侧的电流随着二次侧电流的变化而变化。

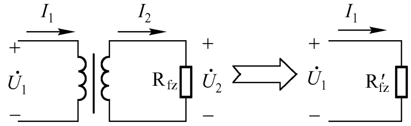


图 8-10　变压器的阻抗变换作用

3．阻抗变换原理

变压器除了能改变交变电压、电流的大小外，还能变换交流阻抗，这在电信工作中有着广

泛的应用。

如图 8-10 所示，若把这个带负载的变压器看成一个新的负载，并以 R'_{fz} 表示，则对于无损耗的变压器来说，其初、次级功率相等，即：

$$I_1^2R'_{fz}=I_2^2R_{fz}$$

将公式 $I_1=\frac{N_2}{N_1}I_2$ 代入 $I_1^2R'_{fz}=I_2^2R_{fz}$，得

$$R'_{fz}=\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2R_{fz}=n^2R_{fz}$$

上式表明，负载 R'_{fz} 接在变压器的次级上，从电源中获取的功率和负载 $R'_{fz}=n^2R_{fz}$ 直接接在电源上所获取的功率是完全相同的。另外，变压器初级交流等效电阻 R'_{fz} 的大小，不但与变压器次级的负载 R_{fz} 成正比，而且与变压器的变比 n 的平方成正比。即

$$n=\sqrt{\frac{R'_{fz}}{R_{fz}}} \tag{8-3}$$

【例 8-1】 有一台降压变压器，一次绕组电压为 220V，二次绕组电压为 110V，一次绕组为 2200 匝，若二次绕组接入阻抗值为 10Ω 的阻抗，问变压器的变比、二次绕组匝数、一次和二次绕组中的电流各为多少？

【解】

$$n=\frac{U_1}{U_2}=\frac{220}{110}=2$$

$$N_2=\frac{N_1U_2}{U_1}=\frac{2200\times110}{220}=1100\text{（匝）}$$

$$I_2=\frac{U_2}{|Z_L|}=\frac{110}{10}=11\text{（A）}$$

$$I_1=\frac{N_2}{N_1}I_2=\frac{1100}{2200}\times11=5.5\text{（A）}$$

【例 8-2】 如图 8-11 所示，交流信号源的电动势 $E=120$V，内阻 $R_0=800\Omega$，负载为扬声器，其等效电阻为 $R_L=8\Omega$。

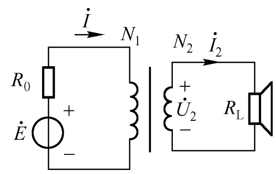


图 8-11

（1）当 R_L 折算到原边的等效电阻时，求变压器的匝数比和信号源输出的功率；

（2）当将负载直接与信号源连接时，信号源输出多大功率？

【解】（1）变压器的匝数比为：$n=\frac{N_1}{N_2}=\sqrt{\frac{R'_L}{R_L}}=\sqrt{\frac{800}{8}}=10$

信号源的输出功率：$P=\left(\frac{E}{R_0+R'_L}\right)^2\times R'_L=\left(\frac{120}{800+800}\right)^2\times800=4.5\text{W}$

（2）将负载直接接到信号源上时，输出功率为：

$$P=\left(\frac{E}{R_0+R_L}\right)^2\times R_L=\left(\frac{120}{800+8}\right)^2\times 8=0.176\text{W}$$

结论：接入变压器以后，输出功率大大提高。因此在电子线路中，常利用阻抗匹配实现最大输出功率。

8.2.3 变压器的功率和效率

1．变压器的功率

变压器的额定容量，即表示变压器允许传递的最大功率。一般用视在功率来表示，即 S_N，单位为 W 或 kW。

单相变压器：
$$S_N=U_{2N}I_{2N}\approx U_{1N}I_{1N} \tag{8-4}$$

三相变压器：
$$S_N=\sqrt{3}U_{2N}I_{2N}\approx\sqrt{3}U_{1N}I_{1N} \tag{8-5}$$

2．变压器功率损耗

变压器功率损耗包括铁损耗和铜损耗两部分。

（1）铁损耗：是由变压器铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗组成的。当外加电压一定，工作磁通一定时，铁损耗是不变的，因此铁损耗为固定损耗。

（2）铜损耗：电流通过绕组时，在电阻上产生的功率损耗。铜损耗的大小随通过绕组的电流变化而变化，因此铜损耗为可变损耗。

3．变压器的效率

所谓变压器的效率就是变压器的输出功率 P_2 与输入功率 P_1 之比的百分数，即

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}\times 100\% \tag{8-6}$$

由于变压器是静止电器，没有机械传动所带来的力量损耗，只有较少的铁损耗和铜损耗，故它的效率比较高。一般供电变压器的效率都在 95%左右，大型变压器的效率可达 98%以上。

8.2.4 常用变压器简介*

1．单相照明变压器

单相照明变压器是一种最常见的变压器，如图 8-12 所示。它是由铁芯和两个相互绝缘的线圈构成的，一般为壳式。通常用来为车间或工厂内部的局部照明灯具提供安全电压，以确保人身安全。这种变压器的初级额定电压有 220V 和 380V 两种，次级电压多为 36V 或 24V。在特殊危险场合使用时，次级电压多为 24V 或 12V。有的变压器次级电压为 6V 左右，专供指示灯用。

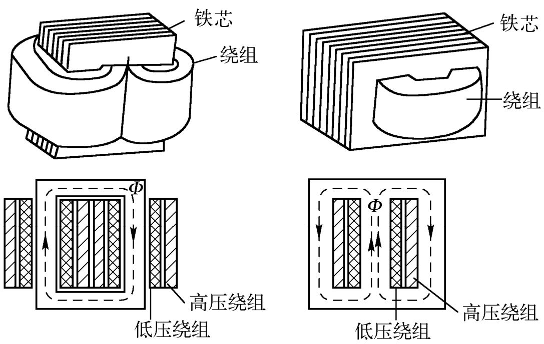


图 8-12　单相变压器

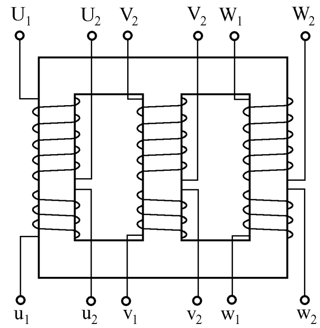


图 8-13　三相变压器

2．三相电力变压器

在现代的电力系统中，普遍采用三相变压器供电，所谓三相变压器，实质上就是 3 个容量相同的单相变压器的组合。但真正的三相变压器不但体积要比容量相同的单相变压器小，而且重量轻、成本低。如图 8-13 所示，根据电力网的线电压和各个初级绕组额定电压的大小，可把 3 个初级绕组接成星形或三角形。根据供电需要，它们的次级绕组也可接成上述形式。

三相变压器的铁芯具有 3 个芯柱，在每个铁芯柱上各装有一个初级绕组和一个次级绕组。各相高压绕组的始、末端分别用 U_1、V_1、W_1 和 U_2、V_2、W_2 表示，低压绕组的始、末端分别用 u_1、v_1、w_1 和 u_2、v_2、w_2 表示，三相电力变压器绕组的接法，常用的有三种：Y/Y_0，Y/△，Y_0/△。分子表示三相高压绕组的接法，分母表示三相低压绕组的接法。一般容量不大的且需要中线的变压器，多采用 Y/Y_0 连接，其中 Y 表示高压绕组作 Y 形连接但无中线，Y_0 表示低压绕组作 Y_0 形连接并有中线。

3．自耦变压器

自耦变压器的一、二次绕组合二为一，二次绕组成为一次绕组的一部分，这种变压器称为自耦变压器，如图 8-14 所示，可见自耦变压器的一、二次绕组之间除了有磁的耦合外，还有电的直接联系。



图 8-14　自耦变压器

如果把自耦变压器的抽头做成滑动触点，就构成输出电压可调的自耦变压器，称为自耦调压器。常用的单相调压器，一次绕组输入电压 U_1＝220V，二次绕组输入电压 U_2＝0～250V，使用时，改变滑动端的位置，便可得到不同的输出电压。实训室中用的调压器就是根据此原理制作的。

注意：初级、次级千万不能对调使用，以防变压器损坏。

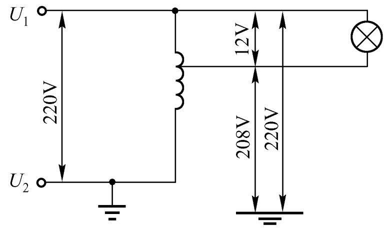


图 8-15 自耦变压器使用时不安全状况

自耦变压器的优点是结构简单、节省材料、体积小、成本低。缺点为因一次、二次绕组之间有电联系，接线不正确时安全隐患大。如图 8-15 所示为自耦变压器给携带式安全照明灯提供 12V 的工作电压，因为 U_2 点接地，此时连接灯泡的每根导线对地的电压都是 200V 以上，这对持灯人极不安全。

4．仪用互感器

专供测量仪表使用的变压器称为仪用互感器，简称互感器。根据用途不同，互感器可分为电压互感器和电流互感器两种。

1）电压互感器

电压互感器的结构和工作原理与普通变压器空载情况相似。使用时，必须把匝数较多的高压绕组跨接在被测的高压电路上，而匝数较少的低压绕组则与电压表、电压继电器或其他仪表的电压线圈相连接。电压互感器的接线图如图 8-16 所示。

电压互感器的 $N_2 < N_1$，可将线路上的高电压变为低电压来测量。通常规定电压互感器二次侧绕组的额定电压设计成标准值 100V。被测电压的大小等于二次侧电压表的读数与变压比的乘积。

使用电压互感器时的注意事项：

（1）电压互感器运行中，二次侧绕组不能短路，否则会烧坏绕组。为此，二次侧要装熔断器保护。

（2）铁芯、低压绕组的一端要可靠地接地，以防在绝缘损坏时，在次级出现高压。

2）电流互感器

电流互感器是在测量大电流时用来将大电流变成小电流的升压变压器。使用时，应把匝数少的初级绕组串联在被测大电流的电路中；而匝数较多的次级绕组则与安培表、电流继电器或其他仪表的电流线圈相串接成一闭合回路。电流互感器的接线图如图 8-17 所示。

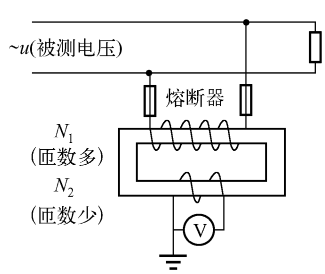


图 8-16 电压互感器的接线图

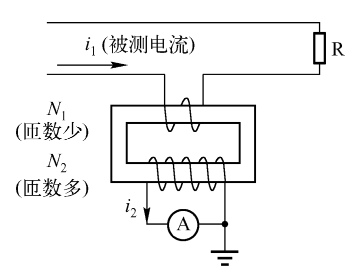


图 8-17 电流互感器的接线图

电流互感器 $N_1 < N_2$，可将线路上的大电流变为小电流来测量。通常，电流互感器一次侧绕组的额定电流设计成标准值 5A。被测电流的大小等于二次侧电流表的读数与变流比的乘积。

使用电流互感器时的注意事项：

（1）电流互感器运行中二次侧绕组不能开路，否则会产生高电压，危及仪表和人身安全，因此二次侧不能接熔断器；运行时如要拆下电流表，必须先将二次侧短路拆下。

（2）电流互感器铁芯和二次侧绕组的一端要可靠地接地，以防在绝缘损坏时，在二次侧出现过压而危及仪表和人身安全。

便携式钳形电流表就是利用电流互感器原理制作的，其外形如图 8-18 所示。

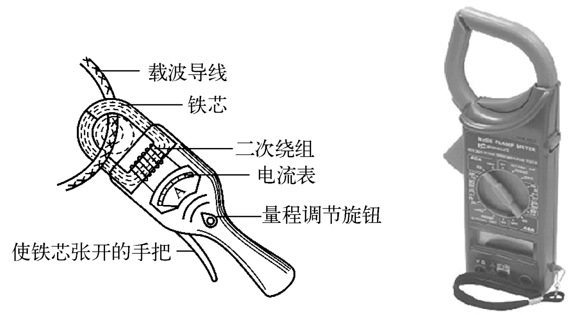
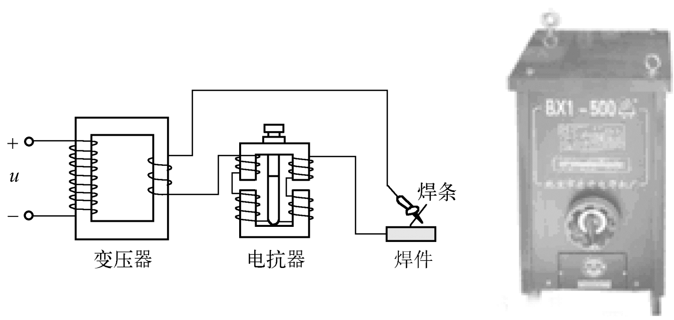


图 8-18　便携式钳形电流表

钳形电流表的闭合铁芯可以张开，将被测载流导线钳入铁芯窗口中，可直接读出被测电流的数值。用钳形电流表测量电流不用断开电路，使用非常方便。

5．电焊变压器

电焊变压器是一种降压升流变压器，它的二次绕组因电压较低而能够输出大电流，从而在焊条和焊件之间燃起电弧，利用电弧的高温熔化金属达到焊接目的。电焊变压器实质上是一台特殊的降压变压器。其原理图及外形如图 8-19 所示。



（a）原理图　　（b）外形

图 8-19　电焊变压器

电焊变压器的工作原理：为了起弧较容易，电焊变压器的空载电压一般为 60～75V，当电弧起燃后，焊接电流通过电抗器产生电压降。调节电抗器上的旋柄可改变电抗的大小，以控制焊接电流及焊接电压。维持电弧工作电压一般为 25～30V。

为了保证焊接质量和电弧燃烧的稳定性，电焊变压器应满足以下条件。

（1）为保证容易起弧，二次侧空载电压应在 60～75V 之间，最高不超过 85V。

（2）负载运行时具有电压迅速下降的外特征，一般在额定负载时输出电压在 30V 左右。

（3）焊接电流可在一定范围内调节。

（4）短路电流不应过大，一般不超过额定电流的 2 倍，且焊接电流稳定。

8.3 交流电动机

根据电磁感应原理进行机械能与电能互换的旋转机械称为电动机。其中将机械能转换为电能的电动机称为发电机，将电能转换为机械能的电动机称为电动机。由于生产过程的机械化，电动机作为拖动生产机械的原动机，在现代生产中有着广泛的应用。

电动机可分为交流电动机和直流电动机两大类。交流电动机又可分为异步电动机（或称感应电动机）和同步电动机。异步电动机有单相和三相两种。单相电动机一般为 1kW 以下的小容量电动机，在实训室和日常生活中应用较多。三相异步电动机按转子结构不同分为笼型和绕线型两种，三相异步电动机因为具有构造简单、价格低廉、工作可靠、易于控制及使用维护方便等突出优点，在工农业生产中应用很广。如工业生产中的轧钢机、起重机、机床、鼓风机等，均用三相异步电动机来拖动。

8.3.1 三相笼型交流异步电动机的基本结构

三相笼型交流异步电动机由定子和转子两个基本部分组成。定子是固定部分，转子是转动部分。为了使转子能够在定子中自由转动，定子、转子之间有 0.2～2mm 的空气隙。如图 8-20 所示为鼠笼型异步电动机拆开后各个部件的形状。

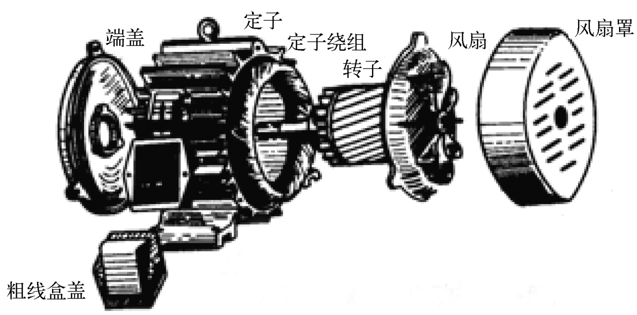


图 8-20　鼠笼型异步电动机的形状

1．定子

定子主要用来产生旋转磁场，它是由定子铁芯、定子绕组、机壳等组成的。

1）定子铁芯

定子铁芯是磁路的一部分，为了降低铁芯损耗，采用 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成，硅钢片间彼此绝缘。铁芯圆周上分布有若干均匀的平行槽，用来嵌放定子绕组，如图 8-21（a）所示。

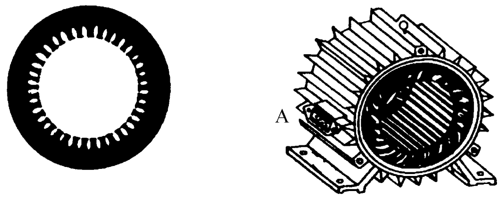
2）机壳

机壳包括端盖和机座，其作用是支撑定子铁芯和固定整个电动机。中小型电动机机座一般采用铸铁铸造，大型电动机机座用钢板焊接而成。端盖多用铸铁铸成，用螺栓固定在机座两端，机座如图 8-21（b）所示。

3）定子绕组

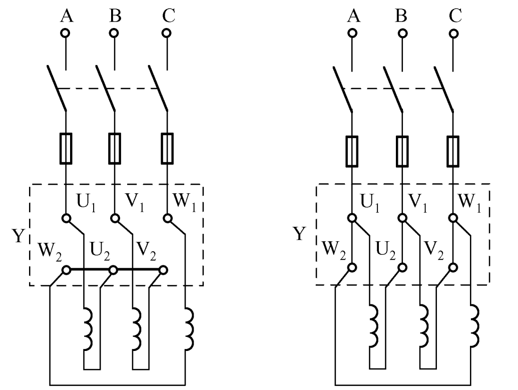
定子绕组是电动机定子的电路部分，应用绝缘铜线或铝线绕制而成。三相绕组对称地嵌放在定子槽内，如图 8-21 所示。三相异步电动机定子绕组的 3 个首端 U_1、V_1、W_1 和 3 个末端 U_2、V_2、W_2，都从机座上的接线盒中引出，如图 8-22 所示。图 8-22（a）为定子绕组的星形接

法；图 8-22（b）为定子绕组的三角形接法。三相绕组具体应该采用何种接法，应视电力网的线电压和各相绕组的工作电压而定。目前我国生产的三相异步电动机，功率在 4kW 以下的一般采用星形接法；在 4kW 以上的一般采用三角形接法。



（a）定子铁芯　　（b）机座

图 8-21　定子



（a）定子绕组的星形接法　　（b）定子绕组的三角形接法

图 8-22　三相定子绕组的接法

2．转子

转子主要用来产生旋转力矩，拖动生产机械旋转。转子由转轴、转子铁芯、转子绕组构成。

1）转轴

转轴用来固定转子铁芯和传递功率，一般用中碳钢制成。

2）转子铁芯

转子铁芯也属于磁路的一部分，它也是用 0.5mm 的硅钢片叠压而成。转子铁芯固定在转轴上，其外圆均匀分布的槽是用来放置转子绕组的。

3）转子绕组

三相笼型异步电动机的转子是由安放在转子铁芯槽内的裸导体和两端的短路环连接而成的。转子绕组就像一个鼠笼，故称其为鼠笼式转子，如图 8-23 所示。

目前，100kW 以下的鼠笼式电动机，一般采用铸铝绕组。这种转子是将融化了的铝液直接浇注在转子槽内，并连同两端的短路环和风扇浇注在一起，该鼠笼式转子也称为铸铝转子，如图 8-24 所示。

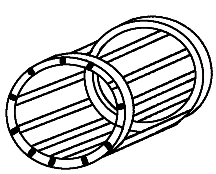


图 8-23　鼠笼绕组

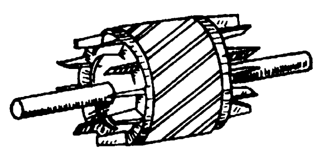


图 8-24　铸铝转子

8.3.2　三相笼型交流异步电动机的工作原理

三相异步电动机是根据磁场与载流导体相互作用产生电磁力的原理制成的。要了解其工作原理，必须首先理解旋转磁场的产生及其性质。

1．旋转磁场

1）旋转磁场的产生

如图 8-25 所示为最简单的三相异步电动机的定子，三相定子绕组对称放置在定子槽中，即三相绕组首端 U_1、V_1、W_1（或末端 U_2、V_2、W_2）的空间位置互差 120°。

若三相绕组连接成星形，末端 U_2、V_2、W_2 相连，首端 U_1、V_1、W_1 接到三相对称电源上，则在定子绕组中通过三相对称的电流 i_U、i_V、i_W（习惯规定电流参考方向由首端指向末端）其波形如图 8-26 所示。

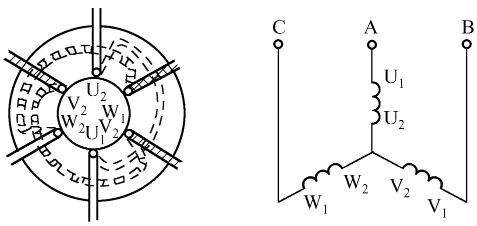


图 8-25　三相定子绕组做星形连接

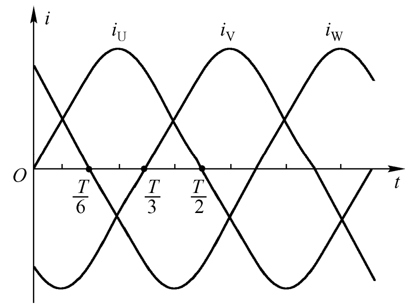


图 8-26　三相电流波形

$$i_U = I_m \sin\omega t$$
$$i_V = I_m \sin（\omega t - 120°）$$
$$i_W = I_m \sin（\omega t + 120°）$$

当三相电流流入定子绕组时，各相电流的磁场为交变、脉动的磁场，而三相电流的合成磁场则是一旋转磁场。为了说明问题，在图 8-27 中选择几个不同瞬间，来分析旋转磁场的形成。

（1）$t=0$ 瞬间（$i_U=0$；i_V 为负值；i_W 为正值）：此时，U 相绕组（U_1、U_2 绕组）内没有电流；V 相绕组（V_1、V_2 绕组）电流为负值，说明电流由 V_2 流进，由 V_1 流出；而 W 相绕组（W_1、W_2 绕组）电流为正，说明电流由 W_1 流进，由 W_2 流出。运用右手螺旋定则，可以确定这一瞬间的合成磁场如图 8-27（a）所示，为一对极（两极）磁场。

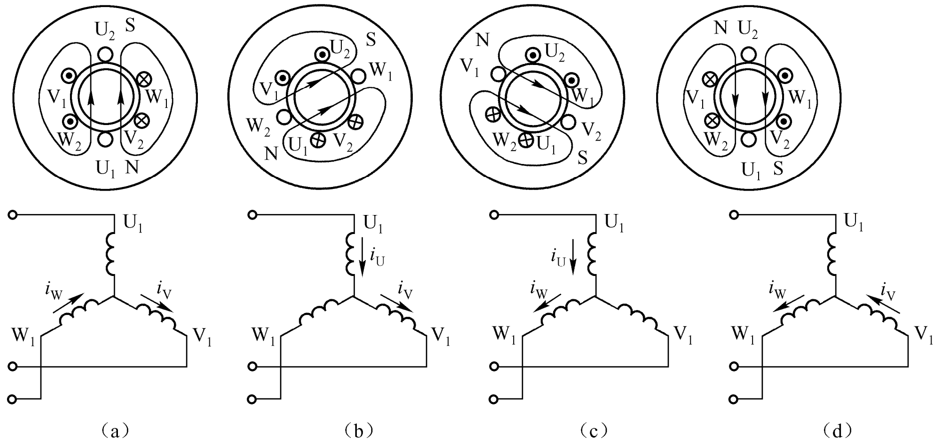


图 8-27　两极电动机的旋转磁场

（2）$t=T/6$ 瞬间（i_U 为正值；i_V 为负值；$i_W=0$）：U 相绕组电流为正，电流由 U_1 流进，由

U_2 流出；V 相绕组电流未变；W 相绕组内没有电流。合成磁场如图 8-27（b）所示，与 $t=0$ 瞬间相比，合成磁场沿顺时针方向旋转了 60°。

（3）$t=T/3$ 瞬间（i_U 为正值；$i_V=0$；i_W 为负值）：合成磁场沿顺时针方向又旋转了 60°，如图 8-27（c）所示。

（4）$t=T/2$ 瞬间（$i_U=0$；i_V 为正值；i_W 为负值）：与 $t=0$ 瞬间相比，合成磁场共旋转了 180°，如图 8-27（d）所示。

由此可见，随着定子绕组中三相对称电流的不断变化，所产生的合成磁场也在空间不断地旋转。从两极旋转磁场可以看出，电流变化一周，合成磁场在空间旋转 360°（一转），且旋转方向与线圈中电流的相序一致。

以上分析的是每相绕组只有一个线圈的情况，产生的旋转磁场具有一对磁极。旋转磁场的极数与定子绕组的排列有关。如果每相定子绕组分别由两个线圈串联而成，如图 8-28 所示，其中，U 相绕组由线圈 U_1U_2 和 $U'_1U'_2$ 串联组成，V 相绕组由 V_1V_2 和 $V'_1V'_2$ 串联组成，W 相绕组由 W_1W_2 和 $W'_1W'_2$ 串联组成，当三相对称电流通过这些线圈时，便能产生两对极旋转磁场（四极）。

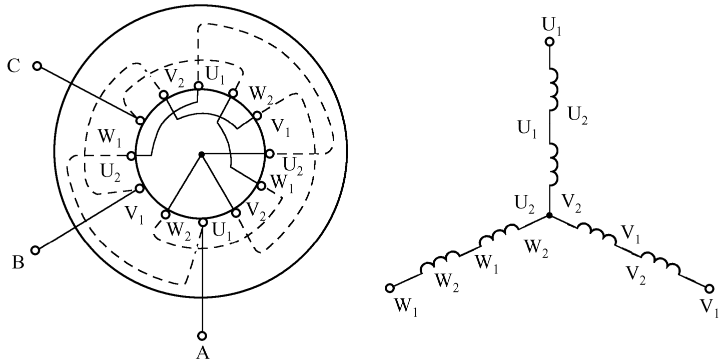


图 8-28　四极定子绕组

当 $t=0$ 时，$i_U=0$；i_V 为负值；i_W 为正值。即 U 相绕组内没有电流；V 相绕组电流由 V'_2 流进，由 V'_1 流出，再由 V_2 流进，由 V_1 流出；W 相绕组电流由 W_1 流进，由 W_2 流出，再由 W'_1 流进，由 W'_2 流出。此时，三相电流的合成磁场如图 8-29（a）所示。图 8-29（b）、图 8-29（c）、图 8-29（d）分别表示当 $t=T/6$、$t=T/3$、$t=T/2$ 时的合成磁场。

从图 8-29 中不难看出，四极旋转磁场在电流变化一周时，旋转磁场在空间旋转 180°。

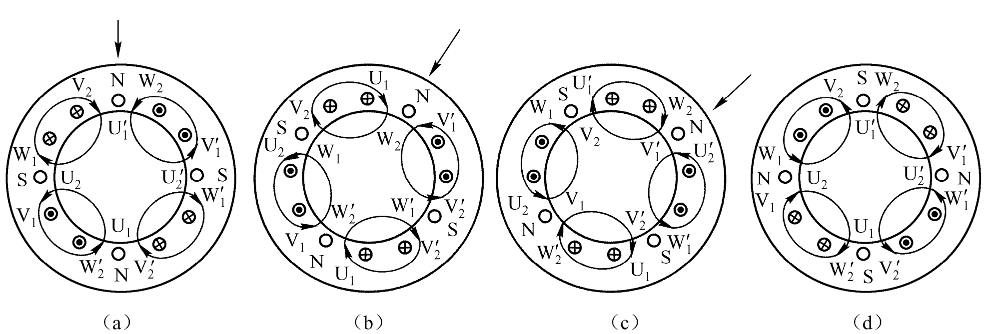


图 8-29　四极电动机旋转磁场

2）旋转磁场的转速

由以上分析可以看出，旋转磁场的转速与磁极对数、定子电流的频率之间存在着一定的关系。一对极的旋转磁场，电流变化一周时，磁场在空间转过 360°（1 转）；两对极的旋转磁场，电流变化一周时，磁场在空间转过 180°（1/2 转）；由此类推，当旋转磁场具有 p 对磁极时，电流变化一周，其旋转磁场就在空间转过 $1/p$ 转。

通常转速是以每分钟的转数来表示的，所以旋转磁场转速的计算公式为

$$n_1=\frac{60f_1}{p} \tag{8-7}$$

式中　n_1——旋转磁场的转速，又称同步转速（r/min）；

f_1——定子电流的频率（Hz）；

p——旋转磁场的极对数。

国产的异步电动机，定子绕组的电流频率为 50Hz，所以不同极对数的异步电动机所对应的旋转磁场的转速也就不同（见表 8-1）。

表 8-1　异步电动机转速和极对数的对应关系

p	1	2	3	4
n_1（r/min）	3000	1500	1000	750

旋转磁场的转向与电流的相序一致，例如，图 8-27 和图 8-29 中电流的相序为 U—V—W，则磁场旋转的方向为顺时针。必须指出，电动机三相绕组的任一相都可以是 U 相（或 V 相、W 相），而电源的相序总是固定的（正相序）。因此，如果将三根电源线中的任意两根（如 U 和 V）对调，也就是说，电源的 U 相接到 V 相绕组上，电源的 V 相接到 U 相绕组上，在 V 相绕组中，流过的电流是 U 相电流 i_U，而在 U 相绕组中，流过的是 V 相电流 i_V，这时，三相对称的定子绕组中电流的相序为 U—W—V（逆时针），所以旋转磁场的转向也变为逆时针了。

2．三相异步电动机的工作原理

当电动机的定子绕组通以三相交流电时，便在气隙中产生旋转磁场。设旋转磁场以 n_1 的速度沿顺时针方向旋转，则静止的转子绕组同旋转磁场就有了相对运动，从而在转子导体中产生了感应电动势，其方向可根据右手定则来判断（假定磁场不动，导体以相反的方向切割磁力线）。如图 8-30 所示，可以确定出上半部导体的感应电动势垂直纸面向外，下半部导体的感应电动势垂直于纸面向里。由于转子电路为闭合电路，在感应电动势的作用下，产生了感应电流。

由于载流导体在磁场中要受到力的作用，因此，可以用左手定则确定转子导体所受电磁力的方向，如图 8-30 所示。这些电磁力对转轴形成一电磁转矩，其作用方向与旋转磁场的旋转方向一致。这样，转子便以一定的速度沿旋转磁场的旋转方向转动起来。

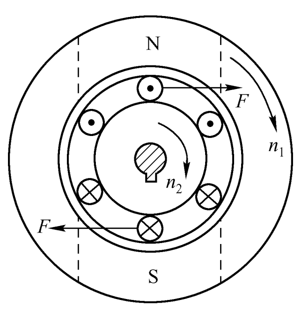


图 8-30　异步电动机的工作原理

从上面的分析可以知道，异步电动机电磁转矩的产生必须具备下列条件：①气隙中有旋转磁场；②转子导体中有感应电流。不难知道，在三相对称的定子绕组中通以三相对称

的电流就能产生旋转磁场，而闭合的转子绕组在感应电动势的作用下能够形成感应电流，从而产生相应的电磁力矩。如果旋转磁场反转，则转子的旋转方向也会随之改变。

电动机不带机械负载的状态称为空载。这时负载转矩是由轴与轴承之间的摩擦力及风阻力等造成的，称为空载转矩，其值很小。这时电动机的电磁转矩也很小，但其转速 n_0（称空载转速）很高，接近于同步转速。

异步电动机的工作原理与变压器有许多相似之处，如二者都是依靠工作磁通为媒介来传递能量；异步电动机每相定子绕组的感应电动势 E_1 也近似与外加电源电压 U_1 平衡，即

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi k_1 \tag{8-8}$$

式中，k_1 为定子绕组系数，与电动机的结构有关；Φ 为旋转磁场的每极平均磁通。同样，异步电动机定子电路与转子电路的电流也满足磁通势平衡关系，即

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1 \tag{8-9}$$

由式（8-9）可知，当异步电动机的负载增大时，转子电流增大，在外加电压不变时，定子绕组电流也增大，从而抵消转子磁通势对旋转磁通的影响。可见，与变压器类似，定子绕组电流是由转子电流来决定的。

8.3.3 三相笼型交流异步电动机的转差率与机械特性

1．三相异步电动机的转差率

异步电动机的转子转速 n 低于同步转速 n_1，两者的差值（n_1-n）称为转差。转差就是转子与旋转磁场之间的相对转速。

转差率就是相对转速（即转差）与同步转速之比，用 S 表示，即

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{8-10}$$

转差率是分析异步电动机运转特性的一个重要参数。在电动机启动瞬间，$n=0$，$S=1$；当电动机转速达到同步转速（为理想空载转速，电动机实际运行中不可能达到）时，$n=n_1$，$S=0$。由此可见，异步电动机在运行状态下，转差率的范围为 $0<S<1$；在额定状态下运行时，$S=0.02 \sim 0.06$。

$$n = (1-S)n_1 = (1-S)\frac{60 f_1}{p} \tag{8-11}$$

【例 8-3】一台三相四极 50Hz 异步电动机，已知额定转速为 1440 r/min。求额定转差率 S_N。

【解】该电动机的同步转速为

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500\text{r/min}$$

因此电动机的额定转差率为

$$S_N = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

2．三相异步电动机的机械特性

电动机的机械特性就是指电动机的转速和电动机的电磁转矩之间的关系，如图 8-31 所示。

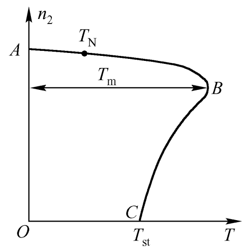


图 8-31　三相异步电动机的机械特性曲线

研究机械特性的目的是为了分析电动机的运行性能。在图 8-31 中，*BC* 为不稳定运行阶段，*AB* 为稳定运行区。在稳定区，若电动机拖动的负载发生变化，电动机能适应负载的变化而自动调节达到稳定运行。

下面介绍异步电动机机械特性曲线上的 3 个特征转矩。

1）额定转矩 T_N

电动机在额定电压下，以额定转速 n_N 运行，输出额定功率 P_N 时，电动机转轴上输出的转矩，称为额定转矩 T_N。

电动机在额定状态下运行的转矩 T_N，可由铭牌上的 P_N 和 n_N 求得

$$T_N = 9550\frac{P_N}{n_N} \tag{8-12}$$

式中，P_N 的单位为 kW，n_N 的单位为 r/min，T_N 的单位为 N · m。

2）最大转矩 T_m

电动机带动最大负载的能力，称为最大转矩。应当注意，当电动机的负载转矩大于最大转矩时，电动机就要停转，所以最大转矩也称为停转转矩。此时，电动机的电流可达额定电流的 3～5 倍，电动机会因严重过热而烧坏绕组。

最大转矩对电动机的稳定运行有重要的意义。当电动机负载增大而过载时，电磁转矩接近于最大转矩，此时应当保证电动机稳定运行，不因短时过载而停转（但长时间过载也会造成电动机过热损坏），因此，要求电动机要有一定的过载能力。电动机的过载能力可用下式表示

$$\lambda_T = \frac{T_m}{T_N} \tag{8-13}$$

λ_T 即为电动机的过载能力，一般三相异步电动机的过载能力在 1.8～2.2 范围内。

3）启动转矩 T_{st}

启动转矩为电动机启动瞬间（$n=0$，$S=1$）的转矩。只有在启动转矩大于负载转矩时，异步电动机才能启动。启动转矩越大，启动越迅速。因此，用启动转矩倍数 K_{st} 来反映异步电动机启动能力。

$$K_{st} = \frac{T_{st}}{T_N} \tag{8-14}$$

一般中小型异步电动机的 $K_{st}=1.2$～2.4，大型异步电动机 $K_{st}=0.5$～0.8。

综上所述，三相交流异步电动机有如下主要特点：异步电动机有较硬的机械特性，即随着负载的变化而转速变化较小，异步电动机有较大的过载能力和启动能力，电源电压的波动对异步电动机的工作影响较大。

8.3.4 三相笼型交流异步电动机的铭牌

1．三相异步电动机的铭牌

如某三相异步电动机铭牌如下，现对铭牌的各项数据做简要介绍。

型号 Y160M-6	功率 7.5kW	频率 50Hz
电压 380V	电流 17A	接法△
转速 970r/min	绝缘等级 B	工作方式连续
年　月　编号		××电动机厂

（1）型号：型号用来表示电动机的种类和形式，由汉语拼音字母、国际通用符号和阿拉伯数字组成。

例如，在 Y160M-6 中：

- Y——产品代号，三相异步电动机；
- 160——机座中心高 160mm；
- M——机座长度代号（M 表示中机座，S 表示短机座，L 表示长机座）；
- 6——磁极数。

各类常见电动机的产品名称代号及其意义如下：

- YR——绕线型三相异步电动机；
- YB——防爆型异步电动机；
- YZ——起重、冶金用异步电动机；
- YQ——高启动转矩异步电动机；
- YD——多速三相异步电动机。

（2）额定功率：额定功率为电动机在额定状态下运行时，转子轴上输出的机械功率，单位为 kW。

（3）额定电压和接法：额定电压指定子绕组按铭牌上规定的接法连接时应加的线电压值。

（4）额定电流：额定电流指电动机在额定运行情况下，定子绕组取用的线电流值。

（5）额定转速：额定转速为电动机在额定运行状态时的转速，单位为 r/min。

（6）额定频率：额定频率指额定电压的频率，国产电动机均为 50Hz。

（7）温升及绝缘等级：绝缘等级是电动机定子绕组所用的绝缘材料的等级。温升是电动机运行时绕组温度允许高出周围环境温度的数值。绝缘等级及极限工作温度列于表 8-2 中。表中极限工作温度是指电动机运行时绝缘材料的最高允许温度。

表 8-2　绝缘等级及极限工作温度

绝 缘 等 级	A	E	B	F	H	C
极限工作温度（℃）	105	120	130	155	180	>180

（8）工作方式：工作方式即指电动机的运行方式。按负载持续时间的不同，国家标准把电动机分成三种工作方式，连续工作制、短时工作制和断续周期工作制。

除了铭牌数据外，还可以根据有关产品目录或电工手册查出电动机的其他一些技术数据。

2．三相异步电动机的选择

1）功率选择

功率选择的原则是根据拖动的负载，最经济、合理地确定电动机的功率。要防止选择的功

率过大，避免出现“大马拉小车”现象，既浪费能源，又增加了投资；同时也应当防止选择的功率过小，电动机可能在过载状态下工作，很容易烧坏定子绕组。电动机的功率选择，一般按电动机的工作方式通过计算确定。详细的计算方法可参阅有关电动机手册。

实践证明，电动机在接近额定状态下工作时，定子电路的功率因数最高。

2）类型的选择

电动机的类型选择，应根据生产机械的要求，从技术和经济方面全面考虑，进行选择。生产机械不带负载启动的，通常采用鼠笼式异步电动机，如一般机床、水泵等；若要带一定大小的负载启动，可采用高启动转矩电动机；若启动、制动频繁，且要求启动转矩大，可选用绕线型异步电动机，如起重机、轧钢机等。

3）结构形式的选择

为使电动机在不同的环境中安全可靠地工作，防止电动机可能对环境造成灾害，必须根据不同的环境要求选用适当的防护形式。常见的防护形式有：开启式、防护式、封闭式和防爆式四种。

4）转速选择

电动机的额定转速应根据生产机械的要求选定。转速高的电动机，体积小，价格便宜；而转速低的电动机，体积大，价格贵。应当本着经济的目的，结合生产机械传动机构的成本选择合适转速的电动机。

5）电压的选择

电压选择主要依据电动机运行场所供电网的电压等级，同时还应兼顾电动机的类型和功率。小容量的电动机额定电压均为 380V，大容量的电动机有时采用 3kV 和 6kV 的高压电动机。

8.3.5　三相绕线式异步电动机*

在生产实际中，对要求启动转矩较大且能平滑调速的场合，常常采用三相绕线式异步电动机。绕线式异步电动机的优点是可以通过在转子绕组中串联电阻来改善机械特性，从而达到减小启动电流、增大启动转矩的目的。

绕线转子的铁芯和笼型转子的铁芯相同，但它的绕组与笼型转子不同，而与定子绕组一样，也是三相绕组，一般接成星形，如图 8-32 所示。它的 3 个出线端从转子轴中引出，固定在轴上的 3 个互相绝缘的集电环上，然后经过电刷的滑动接触与外加变阻器相接。改变变阻器手柄的位置，可使绕线转子三相绕组串联接入变阻器或使之短路。绕线式异步电动机的转子结构较复杂，价格较贵，一般用于对启动和调速性能有较高要求的场合。

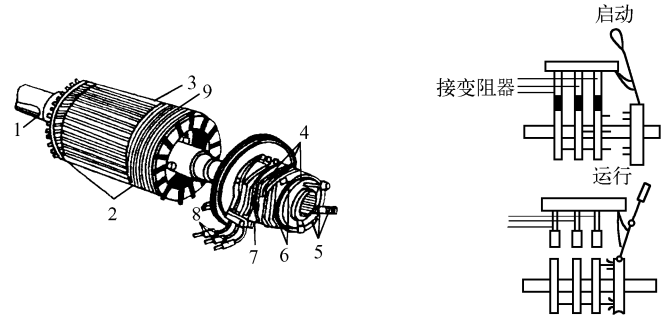


图 8-32　三相绕线式异步电动机

1—转轴；2—三相转子绕组；3—转子铁芯；4—滑环；5—转子绕组出线头；6—电刷；

7—刷架；8—电刷外接线；9—钢丝箍

上述两类异步电动机，尽管转子结构不同，但它们的基本原理是相同的。

8.3.6 单相交流异步电动机*

由单相电源供电的异步电动机称为单相异步电动机。其基本原理建立在三相异步电动机的基础上，但在结构、特性等方面与三相异步电动机有很大的差别。

1．单相异步电动机的工作原理

单相异步电动机的定子绕组为单相交流绕组，转子绕组为鼠笼式绕组。图 8-33 是最简单的单相异步电动机的结构与磁场。

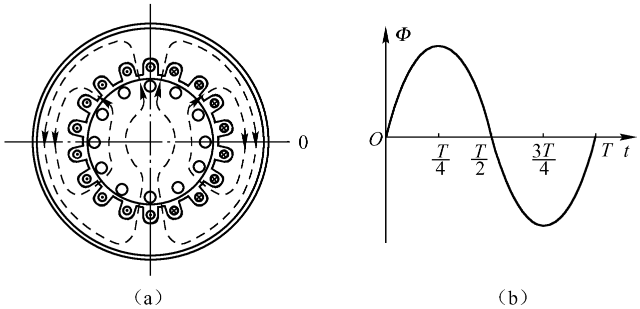


图 8-33　单相异步电动机的结构和磁场

当定子绕组中通入单相正弦交流电流时，则在电动机中产生一个随时间按正弦规律变化的脉动磁场，磁感应强度可表示为

$$B=B_m=\sin\omega t \tag{8-15}$$

这个脉动磁场可分解为两个旋转磁场，这两个旋转磁场转速相等、方向相反，且每个旋转磁场的磁感应强度的最大值为脉动磁场磁感应强度最大值的一半，即

$$B_{1m}=B_{2m}=\frac{1}{2}B_m \tag{8-16}$$

在任何瞬间，这两个旋转磁场的合成磁感应强度，始终等于脉动磁场的瞬时值。转子不动时，上述两个旋转磁场将分别在转子中产生大小相等、方向相反的电磁转矩，转子上的合成转矩为零，电动机无启动转矩，不能启动。但是，如果用某种方法使电动机的转子向某一个方向转动一下，那么电动机就会沿着某个方向持续转动下去。这就说明此时两个反向旋转磁场产生的合成转矩不为零。其原因如下：若外力作用使转子顺正向旋转磁场方向（假定为顺时针）转动，此时转子和正向旋转磁场的相对速度变小，其转差率 s^+ 变小（<1）；而与反向旋转磁场（假定为逆时针）的相对速度变大，转差率 s^- 大于 1，即

$$s^+=\frac{n_1-n}{n_1}<1 \tag{8-17}$$

$$s^-=\frac{-n_1-n}{-n_1}=\frac{n_1+n}{n_1}=\frac{n_1+n_1(1-s^+)}{n_1}=2-s^+>1 \tag{8-18}$$

与三相异步电动机一样，正向旋转磁场产生正向转矩，反向旋转磁场产生反向转矩，其转矩特性曲线如图 8-34 所示。图中 $T=f(s)$ 是合成转矩的特性曲线。同理，若推动转子逆时针转动，电动机就沿着逆时针方向持续旋转。

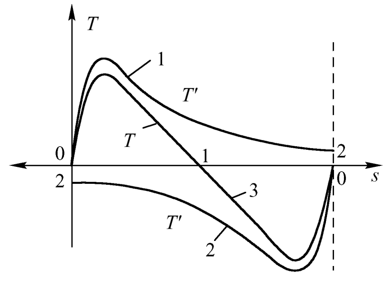


图 8-34　单相异步电动机的转矩特性曲线

2．单相异步电动机的启动方法

从上述可知，单相异步电动机的转动原理与三相异步电动机类似，但单相异步电动机无启动转矩，所以首先必须解决它的启动问题。单相异步电动机的启动方法通常有分相启动和罩极启动两种。这里主要介绍电容分相式电动机。

1）电容分相式电动机的基本结构

在单相异步电动机的定子槽中，除嵌有一套主绕组外，还增加了一套启动绕组。图 8-35 所示为一台最简单的带有启动绕组的单相异步电动机结构，在启动绕组中串联的电容器称分相电容。

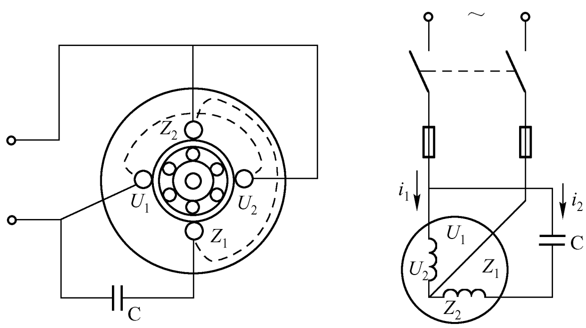


图 8-35　电容分相式单相异步电动机

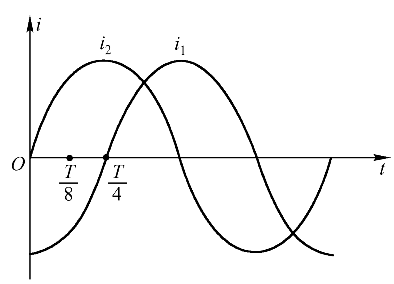


图 8-36　两相电流波形

2）电容分相式电动机的工作原理

由于启动绕组中串接了电容器，所以在同一单相交流电源中，启动绕组中通过的电流与主绕组通过的电流是不同相位的。启动绕组的电流超前于主绕组电流某一角度。若电容器的容量合适，则启动绕组的电流超前于主绕组电流约 90°相位角，如图 8-36 所示。因为这种电动机将单相电流分为两相电流，故称为分相式电动机。因此，在两相电流作用下，这种电动机便可产生两相旋转磁场，如图 8-37 所示，原理分析同三相异步电动机。

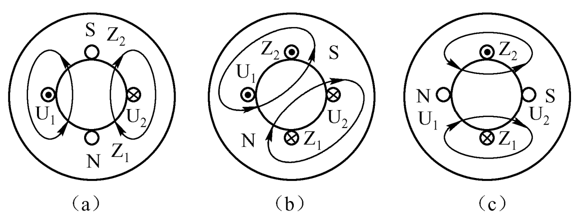


图 8-37　单相异步电动机的旋转磁场

应当指出，单相异步电动机在启动以后，若将启动绕组断开，电动机仍能维持旋转。与此类似的是三相异步电动机在运行过程中，如一相断开，电动机成为单相运行，电动机虽仍能旋转，但很容易造成损坏。

单相异步电动机的效率、功率因数、过载能力都较低，但因为它能在单相电路中运行，所以也有一定的应用场合，如家用电器、医疗器械及许多电动工具中，通常采用单相异步电动机。

8.4 直流电动机*

8.4.1 直流电动机的基本结构

直流电动机虽然比三相交流异步电动机结构复杂，维修也不便，但由于它的调速性能较好，以及启动转矩较大，因此，对调速要求较高的生产机械或者需要较大启动转矩的生产机械往往采用直流电动机驱动。

直流电动机的优点：

（1）调速性能好，调速范围广，易于平滑调节。

（2）启动、制动转矩大，易于快速启动、停车。

（3）易于控制。

1. 直流电动机的构造

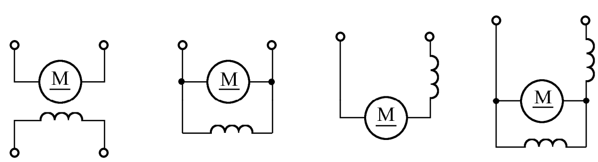
直流电动机由定子和转子（又称为电枢）两大部分组成，定子与转子之间的空隙称为空气隙。

定子的主要作用是产生磁场，它包括主磁极、换向磁极、机座和电刷装置等。主磁极由铁芯和励磁线圈组成，用于产生一个恒定的主磁场；换向磁极安装在两个相邻的主磁极之间，用来减小电枢绕组换向时产生的火花；机座的作用一方面是起导磁作用，作为电动机磁路的一部分，另一方面起支撑作用。电刷装置的作用是通过与换向器之间的滑动接触，把直流电压、直流电流引入或引出电枢绕组。

转子由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。电枢铁芯上冲有槽孔，槽内放电枢绕组，电枢铁芯也是直流电动机磁路的组成部分。电枢绕组的一端装有换向器，换向器由许多铜质换向片组成一个圆柱体，换向片之间用云母绝缘。换向器是直流电动机的重要构造特征，换向器通过与电刷的摩擦接触，将两个电刷之间固定极性的直流电流变换成为绕组内部的交流电流，以便形成固定方向的电磁转矩。

2. 直流电动机的分类

直流电动机按照励磁方式可分为他励电动机、并励电动机、串励电动机和复励电动机四种，如图 8-38 所示。



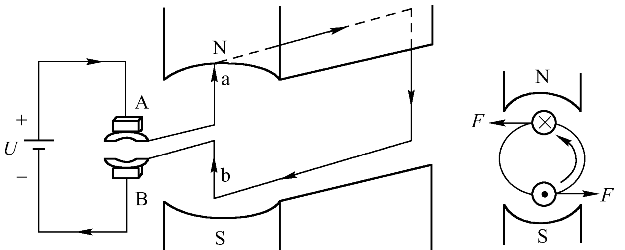
（a）他励式　（b）并励式　（c）串励式　（d）复励式

图 8-38　直流电动机的分类

8.4.2 直流电动机的工作原理

1．直流电动机的基本工作原理

直流电动机是根据通电导体在磁场内受力而运动的原理制成的。如图 8-39（a）所示，接通直流电压 U 时，直流电流为从 a 边流入，b 边流出，由于 a 边处于 N 极之下，b 边处于 S 极之下，则线圈受到电磁力而形成一个逆时针方向的电磁转矩 T，使电枢绕组绕轴线方向逆时针转动。当电枢转动半周后，a 边处于 S 极之下，而 b 边处于 N 极之下。由于采用了电刷和换向器装置，此时电枢中的直流电流方向变为从 b 边流入，从 a 边流出。电枢仍受到一个逆时针方向的电磁转矩 T 的作用，继续绕轴线方向沿逆时针方向转动，如图 8-39（b）所示。



（a）直流电动机原理图　　（b）线圈受力方向

图 8-39　直流电动机原理图

由此可以归纳出直流电动机的工作原理：直流电动机在外加电压的作用下，在导体中形成电流，载流导体在磁场中将受电磁力的作用，由于换向器的换向作用，导体进入异性磁极时，导体中的电流方向也相应改变，从而保证了电磁转矩的方向不变，使直流电动机能连续旋转，把电能转换成机械能输出。

2．电磁转矩与电压平衡方程

1）电枢感应电动势

当电枢通电以后，电动机在电磁转矩作用下沿逆时针方向转动。当电枢旋转时，电枢上的导体就要切割磁力线。根据电磁感应理论，导体内要产生感应电动势。但是由于电动机内各绕组导体分布在气隙磁场的不同位置，因此各个导体的感应电动势是不同的。为了方便说明，应先求出气隙磁场中的平均磁感应强度，然后再求出每根导体中的平均感应电动势，进而求得电枢电动势 E_a。

$$E_a = C_e \Phi n \tag{8-19}$$

式中　C_e——电动机结构常数，$C_e = \dfrac{Np}{60a}$；

n——电动机转速（r/min）；

Φ——主磁通（Wb）；

N——电枢绕组的导体总数；

p——磁极对数；

a——电枢绕组中的支路对数；

E_a——电枢电动势（V）。

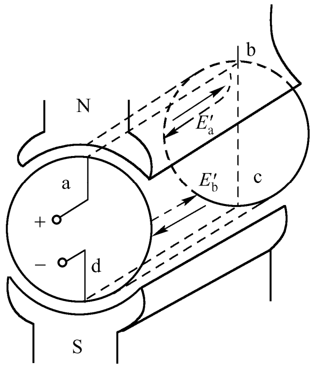


图 8-40　直流电动机电枢绕组中的电流与电动势方向

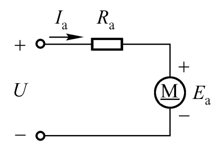


图 8-41　电枢回路

如图 8-40 所示为直流电动机电枢绕组中的电流与电动势方向，由图可知，电枢感应电动势 E_a 与电枢电流或外加电压方向总是相反，所以称反电势。

2）电枢回路电压平衡式

由直流电动机的工作原理可以知道，载流导体在磁场中受力而使电枢旋转，此时电枢绕组将切割主磁场而产生感应电动势 E_a，E_a 的方向与外加电流 I_a 的方向相反，故称为反电动势。电源必须克服反电动势做功，达到将电能转换成机械能的目的。电枢回路电压平衡方程式可以从直流电动机的工作电路中直接得到，如图 8-41 所示，由基尔霍夫第二定律可知

$$U=E_a+I_a R_a \tag{8-20}$$

式中　U——外加电压（V）；

R_a——电枢绕组电阻（Ω）。

3）电磁转矩

直流电动机电枢绕组中的电流（电枢电流 I_a）与磁通 Φ 相互作用，产生电磁力和电磁转矩，直流电动机的电磁转矩公式为

$$\boldsymbol{T}=C_T\Phi I_a \tag{8-21}$$

式中　C_T——电动机转矩常数，$C_T=\dfrac{Np}{2\pi a}$；

Φ——主磁通（Wb）；

I_a——电枢绕组中的电流（A）；

T——电磁转矩（N · m）。

4）转矩平衡方程式

电动机的电磁转矩 T 为驱动转矩，它使电枢转动。在电动机运行时，电磁转矩必须和机械负载转矩及空载损耗转矩相平衡，即

$$T=T_2+T_0 \tag{8-22}$$

式中　T_2——机械负载转矩（即电动机轴上的输出转矩）；

T_0——电动机的空载转矩；

T——电动机的电磁转矩。

当电动机轴上的机械负载发生变化时，通过电动机转速、电动势、电枢电流的变化，电磁转矩将自动调整，以适应负载的变化，保持新的平衡。

8.4.3 直流电动机的使用方法

1．直流电动机的启动

直流电动机直接启动时的启动电流很大，达到额定电流的 10～20 倍，因此必须限制启动电流。限制启动电流的方法就是启动时在电枢电路中串接启动电阻 R_{st}，如图 8-42 所示（启动电阻的值：$R_{st}=\frac{U}{I_{st}}-R_a$）。

一般规定启动电流不应超过额定电流的 1.5～2.5 倍。启动时将启动电阻调至最大，待启动后，随着电动机转速的上升，将启动电阻逐渐减小。

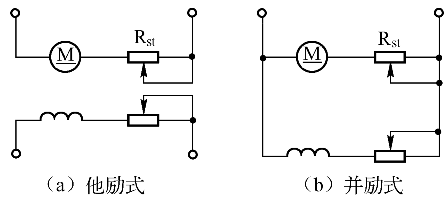


图 8-42　直流电动机的启动

2．直流电动机的调速

根据直流电动机的转速公式 $n=(U-I_aR_a)/C_a\Phi$ 可知，直流电动机的调速方法有三种：改变磁通 Φ 调速，改变电枢电压 U 调速和电枢串联电阻调速。

改变磁通调速的优点是调速平滑，可做到无级调速，调速经济，控制方便，机械特性较硬，稳定性较好。但由于电动机在额定状态运行时磁路已接近饱和，所以通常只是减小磁通将转速往上调，调速范围较小。

改变电枢电压调速的优点是不改变电动机机械特性的硬度，稳定性好，控制灵活、方便，可实现无级调速，调速范围较广。但电枢绕组需要一个单独的可调直流电源，设备较复杂。

电枢串联电阻调速方法简单、方便，但调速范围有限，机械特性变软，且电动机的损耗增大太多，因此只适用于调速范围要求不大的中、小容量直流电动机的调速场合。

3．直流电动机的制动

直流电动机的制动有能耗制动、反接制动和发电反馈制动三种。

能耗制动是在停机时将电枢绕组接线端从电源上断开后立即与一个制动电阻短接，由于惯性，短接后电动机仍保持原方向旋转，电枢绕组中的感应电动势仍存在并保持原方向，但因为没有外加电压，电枢绕组中的电流和电磁转矩的方向发生了改变，即电磁转矩的方向与转子的旋转方向相反，起到了制动作用。

反接制动是在停机时将电枢绕组接线端从电源上断开后立即与一个相反极性的电源相接，电动机的电磁转矩立即变为制动转矩，使电动机迅速减速至停转。

发电反馈制动是在电动机转速超过理想空载转速时，电枢绕组内的感应电动势将高于外加电压，使电动机变为发电状态运行，电枢电流改变方向，电磁转矩成为制动转矩，限制电动机转速过分升高。

8.5 常用低压电器

8.5.1 电器的基本知识

1．低压电器的定义

电器是指用于接通和断开电路或对电路和电气设备进行保护、控制和调节的电工器件。在

电力输配电系统和电力拖动自动控制系统中，电器的应用极为广泛。

凡是对电能的生产、输送、分配和使用起控制、调节、检测、转换及保护作用的电工器件，均可称为电器。用于交流 50Hz、额定电压 1200V 以下，直流额定电压 1500V 以下的电路内起通断、保护、控制或调节作用的电器称为低压电器。

2．低压电器的分类

按用途可分为：配电电器和控制电器。

按动作方式可分为：自动操作电器和手动操作电器。

按执行机构又可分为：有触点电器和无触点电器。

低压配电电器是指用于低压配电系统中对电器及用电设备进行保护和通断、转换电源或负载的电器。如熔断器、刀开关、低压断路器等。

低压控制电器是指用于低压电力传动、自动控制系统和用电设备中，使其达到预期的工作状态的电器。如接触器、主令电器、继电器等。

8.5.2 低压开关

开关是利用触点的闭合和断开在电路中起通断、控制作用的电器。一般情况下用手操作，所以，它又是一种非自动切换的电器。常用的低压电器开关有刀开关、转换开关、自动开关等。

1．刀开关

低压刀开关又称闸刀开关，是一种用来接通或切断电路的手动低压开关。用低压刀开关来接通和切断电路的时候，在刀刃和夹座之间会产生电弧。电路的电压越高，电流越大，电弧就越大。电弧会烧坏闸刀，严重时还会伤人。所以低压刀开关一般用于电流在 500A 以下、电压在 500V 以下的不常开闭的线路中。

低压刀开关的种类很多，常用的有开启式负荷开关、铁壳开关和板形刀开关。

1）开启式负荷开关

开启式负荷开关就是通常所说的胶木闸刀开关，胶木闸刀开关的底座为瓷板或绝缘底板，盒盖为绝缘胶木，它主要由闸刀开关和熔丝组成。这种闸刀开关的特点是结构简单，操作方便，因而在低压电路中应用广泛。

开启式负荷开关主要作为照明电路和小容量 5.5kW 及 5.5kW 以下动力电路不频繁启动的控制开关。

开启式负荷开关的瓷底座上装有进线座、静触头、熔体、出线座和带瓷质手柄的刀式动触头，上面盖有胶盖，以防止操作时触及带电体或分断时产生的电弧飞出伤人。其图形符号如图 8-43 所示，文字符号为 QS。

2）铁壳开关

铁壳开关又称封闭式负荷开关，主要由闸刀、熔断器、夹座和铁壳等组成。它和一般闸刀开关的区别是装有与转轴及手柄相连的速断弹簧。速断弹簧的作用是使闸刀与夹座快速接通和分离，从而使电弧很快熄灭。为了保证安全，铁壳开关装有机械连锁装置，使开关合闸后厢盖打不开；厢盖打开时，开关不能合闸。

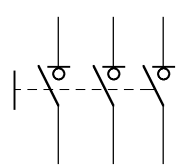


图 8-43　开启式负荷开关的图形符号

铁壳开关适用于工矿企业、农村电力排灌和电热、

照明等各种配电设备中，供手动不频繁地接通与分断电路，以及作为线路末端的短路保护之用。

2．组合开关

组合开关又称转换开关，它的结构与上述刀开关不同，通过驱动转轴实现触点的闭合与分断，也是一种手动控制开关。转换开关通断能力较低，一般用于小容量电动机的直接启动、电动机的正、反转控制及机床照明控制电路中。它结构紧凑、体积小、操作方便。

常用的转换开关有 HZ_1，HZ_2，HZ_3，HZ_4，HZ_{10} 等系列产品。其中 HZ_{10} 系列转换开关具有寿命长、使用可靠、结构简单等优点。

3．自动空气开关

断路器又称自动空气断路器、自动空气开关或自动开关，俗称自动跳闸，是一种可以自动切断故障线路的保护电器。即当线路发生短路、过载、失压等不正常现象时，能自动切断电路，保护电路和用电设备的安全。

低压断路器的作用是在低压电路中分断和接通负荷电路，常用做供电线路的保护开关、电动机及照明系统的控制开关。

常用断路器根据其结构和功能不同，分为小型及家用断路器、塑壳式断路器、万能式断路器和漏电保护断路器四类。

低压断路器由三个基本部分组成：触点和灭弧系统、各种脱扣器、操作机构。触点和灭弧系统是低压断路器的执行元器件，用以接通或分断电路，设置灭弧装置。

断路器设有多种脱扣器，常见的有过载脱扣器、短路脱扣器、欠压脱扣器等。按脱扣动作原理可分为电磁脱扣器和热脱扣器两种。操作机构是执行各个脱扣器动作指令、控制主电路触点接通与切断的装置，通常为四连杆式弹簧储能机构。它有手动操作和电动操作两种操作方式。

低压断路器的图形符号如图 8-44 所示，文字符号为 QF。

8.5.3 熔断器

熔断器是一种最简单而且有效的保护电器。熔断器串联在电路中，当电路或电器设备发生过载和短路故障时，有很大的过载和短路电流通过熔断器，使熔断器的熔体迅速熔断，切断电源，从而起到保护线路及电器设备的作用。熔断器的图形符号如图 8-45 所示，文字符号为 FU。

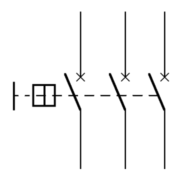


图 8-44　低压断路器的图形符号



图 8-45　熔断器的图形符号

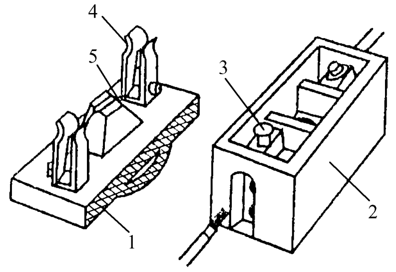


图 8-46　瓷插式熔断器的结构

1—瓷盖；2—瓷座；3—静触头；4—动触头；5—熔丝

熔断器主要由熔体和安装熔体的熔管（或熔座）两部分组成，熔体的材料有两类，一类为低熔点材料：铅锡合金、锌等；另一类为高熔点材料：银丝或铜丝等。

熔管一般由硬制纤维或瓷制绝缘材料制成，既便于安装熔体，又有利于熔体熔断时电弧的熄灭。

熔断器按其结构形式来分类，有插入式、螺旋式、有填料密封管式、无填料密封管式、自复式熔断器等。按用途来分，有保护一般电器设备的熔断器，如在电气控制系统中经常选用的螺旋式熔断器；还有保护半导体器件用的快速熔断器，如用以保护半导体硅整流元器件及晶闸管的 RLS2 产品系列。

1．瓷插式熔断器

瓷插式熔断器是低压分支线路中常用的一种熔断器，结构简单，分断能力小，多用于民用和照明电路。常用的瓷插式熔断器有 RC1A 系列，结构如图 8-46 所示。

2．螺旋式熔断器

螺旋式熔断器的熔管内装有石英砂或惰性气体，有利于电弧的熄灭，因此螺旋式熔断器具有较高的分断能力。熔体的上端盖有一熔断指示器，熔断时红色指示器弹出，可以通过瓷帽上的玻璃孔观察到，其结构如图 8-47 所示。

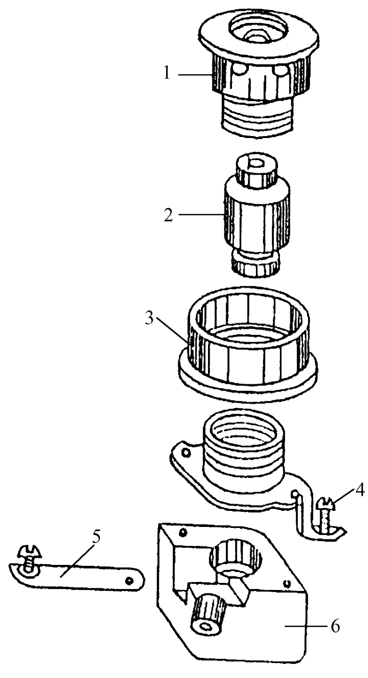


图 8-47　螺旋式熔断器的结构

1—瓷帽；2—熔管；3—瓷套；4—上接线端；
5—下接线端；6—底座

3．快速熔断器

快速熔断器主要用于保护半导体器件或整流装置的短路保护。半导体器件的过载能力很低，因此要求短路保护具有快速熔断的能力。快速熔断器的熔体采用银片冲成的变截面的 V 形熔片，熔管采用有填料的密闭管。常用的有 RLS2、RS3 等系列，NGT 是我国引进德国技术生产的一种分断能力高、限流特性好、功耗低、性能稳定的熔断器。

常用的低压熔断器还有密闭管式熔断器、无填料 RM10 型熔断器、有填料密闭管式熔断器、自复式熔断器等。

下面介绍熔断器的技术参数。

（1）额定电压：熔断器的额定电压是指熔断器长期工作时和分断后，能正常工作的电压，其值一般应等于或大于熔断器所接电路的工作电压。

（2）额定电流：熔断器的额定电流是指熔断器长期工作，温升不超过规定值时所允许通过的电流。一个额定电流等级的熔管，可以配合选用不同的额定电流等级的熔体。但熔体的额定电流必须小于等于熔断器的额定电流。

（3）极限分断能力：熔断器极限分断能力是指在规定的额定电压下能分断的最大的短路电流值。它取决于熔断器的灭弧能力。

熔断器的选择：

（1）熔断器类型的选择。

主要根据负载的过载特性和短路电流的大小来选择。例如，对于容量较小的照明电路或电动机的保护，可采用 RCA1 系列或 RM10 系列无填料密闭管式熔断器。对于容量较大的照明电路或电动机的保护，短路电流较大的电路或有易燃气体的地方，则应采用螺旋式或有填料密闭管式熔断器，用于半导体元器件保护的，则应采用快速熔断器。

（2）熔断器额定电压的选择。

熔断器的额定电压应大于或等于实际电路的工作电压。

（3）熔断器额定电流的选择。

熔断器的额定电流应大于等于所装熔体的额定电流。

（4）保护电动机的熔体的额定电流的选择。

① 保护一台异步电动机时，考虑电动机冲击电流的影响，熔体的额定电流按下式计算：$I_{RN} \geq (1.5\sim2.5)I_N$。式中，$I_N$ 为电动机的额定电流。

② 保护多台异步电动机时，出现尖峰电流时，熔断器不应熔断，则应按下式计算：$I_{RN} \geq (1.5\sim2.5)I_{Nmax} + \sum I_N$。式中，$I_{Nmax}$ 为容量最大的一台电动机的额定电流；$\sum I_N$ 为其余各台电动机额定电流的总和。

（5）熔断器的上、下级的配合。

为使两级保护相互配合良好，两级熔体额定电流的比值不小于 1.6：1，或对于同一个过载或短路电流，上一级熔断器的熔断时间至少是下一级的 3 倍。

8.5.4 交流接触器

1．接触器的用途及分类

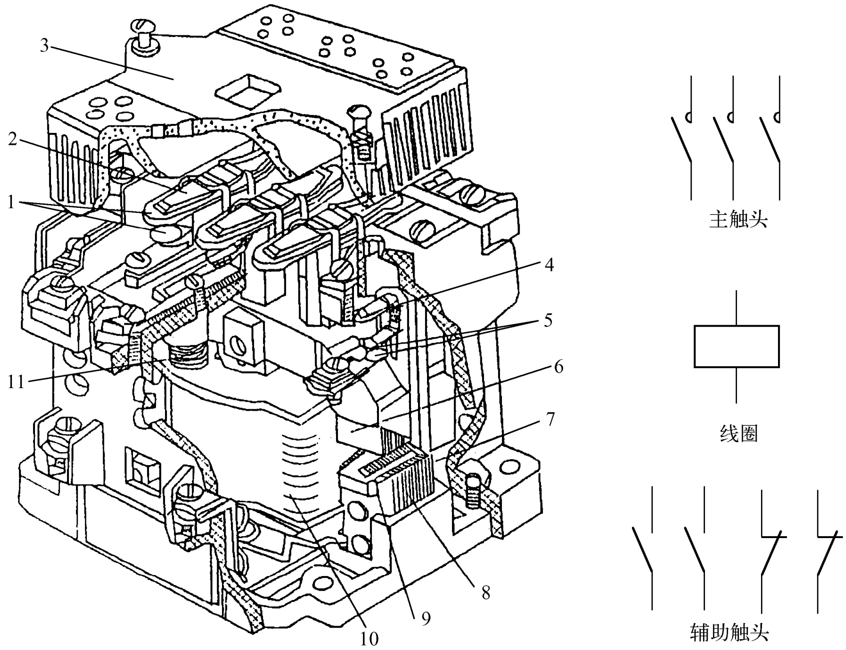
接触器是一种通用性很强的电磁式电器，它可以频繁地接通和分断交、直流主电路，并可实现远距离控制，主要用来控制电动机，也可控制电容器、电阻炉和照明器具等电力负载。

接触器按主触点通过电流的种类，可分为交流接触器和直流接触器。按其主触点的极数，还可分为单极、双极、三极、四极、五极等多种。

2．接触器的工作原理及结构

1）交流接触器

交流接触器主要由电磁系统、触头系统和灭弧装置构成。其结构和符号如图 8-48 所示，文字符号为 KM。



（a）结构　　（b）电路符号

图 8-48　交流接触器

1—常开触头；2—触头压力弹簧片；3—灭弧罩；4，5—辅助触头；6—动铁芯；
7—缓冲弹簧；8—静铁芯；9—短路环；10—线圈；11—反作用弹簧

电磁系统是由线圈、静铁芯、动铁芯（又称衔铁）等组成。线圈通电时产生磁场，动铁芯被吸向静铁芯，带动触头控制电路的接触与分断。动铁芯被吸合时会产生衔铁振动，为了消除这一弊端，在铁芯端面上嵌入一只铜环，一般称之为短路环。接触器有三对主触头和四对辅助触头，三对主触头用于接通和分断主电路，允许通过较大的电流；辅助触头用于控制电路，只允许小电流通过。触头有常开和常闭之分，当线圈通电时，所有的常闭触头首先分断，然后所有的常开触头闭合；当线圈断电时，在反向弹簧力作用下，所有触头都恢复平常状态。接触器的主触头均为常开触头，辅助触头有常开和常闭之分，并按上述联动。

接触器在分断大电流电路时，在动、静触头之间会产生较大的电弧，它不仅会烧坏触头，延长电路分断时间，严重时还会造成相间短路。所以在 20A 以上的接触器中，主触头上均装有陶瓷灭弧罩，以迅速切断触头分断时所产生的电弧。

2）直流接触器

直流接触器主要用于控制直流电压至 440V、直流电流至 1600A 的直流电力线路，常用于频繁地操作和控制直流电动机。直流接触器的结构和工作原理与交流接触器基本相同，在结构上也是由电磁机构、触点系统和灭弧装置等组成，但也有不同之处。如直流接触器线圈中通过的是直流电，产生的是恒定的磁通，不会在铁芯中产生磁滞损耗和涡流损耗，所以铁芯不发热。铁芯是用整块铸钢或铸铁制成，并且由于磁通恒定，其产生的吸力在衔铁和铁芯闭合后是恒定不变的，因此在运行时没有振动和噪声，所以在铁芯上不需要安装短路环。

在直流接触器运行时，电磁机构中只有线圈产生热量，为了使线圈散热良好，通常将线圈绕制成长而薄的圆筒形，没有骨架，与铁芯直接接触，便于散热。直流接触器的主触点在分断

大的直流电时，产生直流电弧，较难熄灭，一般采用灭弧能力较强的磁吹式灭弧。

3．接触器的主要技术参数及型号

1）接触器的主要技术参数

（1）额定电压：接触器铭牌上标注的额定电压是指主触点正常工作的额定电压。交流接触器常用的额定电压等级有 127V、220V、380V、660V；直流接触器常用的电压等级有 110V、220V、440V、660V。

（2）额定电流：接触器铭牌上标注的额定电流是指主触点的额定电流。交、直流接触器常用的额定电流的等级有 10A、20A、40A、60A、100A、150A、250A、400A、600A。

（3）线圈的额定电压：指接触器吸引线圈的正常工作电压值。交流线圈常用的电压等级为 36V、110V、127V、220V、380V；直流线圈常用的电压等级为 24V、48V、110V、220V、440V。选用时交流负载选用交流接触器，直流负载选用直流接触器，但交流负载频繁动作时可采用直流线圈的交流接触器。

2）交流接触器的主要型号

CJ10 系列交流接触器：适用于交流 50Hz、电压至 380V、电流至 150A 的电力线路，做远距离接通与分断线路之用，并适宜于频繁地启动和控制交流电动机。

CJ20 系列交流接触器：适用于交流 50Hz、电压至 660V、电流至 630A 的电力线路，供远距离接通于分断线路之用，并适宜于频繁地启动和控制交流电动机。优点是体积小，重量轻，易于维护。

3）直流接触器的主要型号

CZ0 系列直流接触器：适用于直流电压 440V 以下、电流 600A 及以下的电路，供远距离接通和分断直流电力线路，以及频繁启动、停止直流电动机及控制直流电动机的换向及反接制动。

CZ18 系列直流接触器：适用于直流电压 440V 以下、电流至 1600A 及以下的电路，供远距离接通和分断直流电力线路，以及频繁启动、停止直流电动机及控制直流电动机的换向及反接制动。

4）接触器的选择

在选用交流接触器时应注意两点：第一，主触头的额定电流应等于或大于电动机的额定电流；第二，所用接触器线圈额定电压必须与线圈所接入的控制回路电压相符。

8.5.5　继电器

继电器是一种根据电或非电信号的变化来接通或断开小电流（一般小于 5A）控制电路的自动控制电器。继电器的输入量（如电流、电压、温度、压力等）变化到某一定值时继电器动作，其触点便接通和断开控制回路。由于继电器的触点用于控制电路中，通断的电流小，所以继电器的触点结构简单，不安装灭弧装置。

下面介绍继电器的分类。按输入信号不同可以分为：电流继电器，电压继电器，时间继电器，热继电器以及温度、压力、速度继电器等。按工作原理又可以分为：电磁式继电器，感应式继电器，电动式继电器，电子式继电器等。按输出形式还可分为：有触点和无触点两类。

1．中间继电器

中间继电器触点数量多，触点容量大，在控制电路中起增加触点数量和中间放大的作用，

有的中间继电器还带有短路延时。其线圈为电压线圈，要求当线圈电压为 0 时，衔铁能可靠释放，对动作参数无要求，中间继电器没有弹簧调节装置。其图形符号如图 8-49 所示，文字符号为 KA。

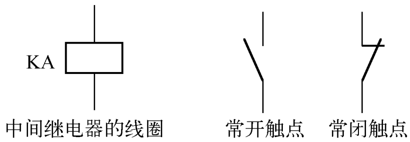


图 8-49　中间继电器的图形符号

2．时间继电器

从得到输入信号（线圈通电或断电）开始，经过一定的延时后才输出信号（触点闭合或断开）的继电器，称为时间继电器。时间继电器的图形符号如图 8-50 所示，文字符号为 KT。

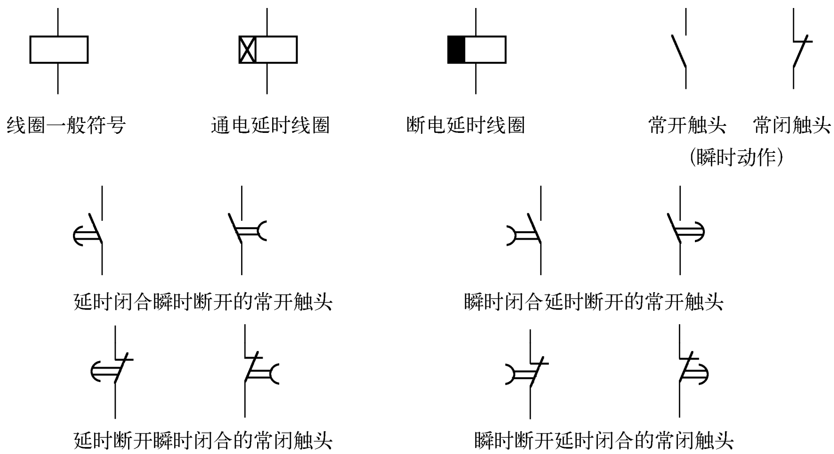


图 8-50　时间继电器的图形符号

如图 8-51 所示为空气阻尼式时间继电器，它是利用空气的阻尼作用而达到延时目的的。JS7-A 系列空气阻尼式时间继电器是利用空气通过小孔节流的原理来获得延时动作的，根据触头的延时特点，它可以分为通电延时与断电延时两种。主要由电磁系统、工作触头、气室和传动机构等部分组成。

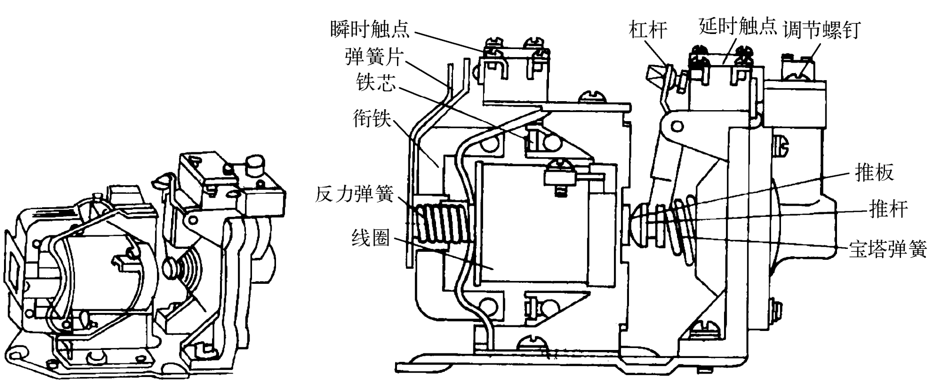


图 8-51　空气阻尼式时间继电器

电磁系统由电磁线圈、静铁芯、衔铁、反作用弹簧片组成，其工作情况与接触器差不多，但结构上有较大的差异。工作触头由两副瞬时触头和两副延时触头组成，每副触头均为一常开和一常闭。气室由橡皮膜、活塞等组成，橡皮膜与活塞可随气室中的气量增减而移动。气室上面有一颗调节螺钉，可调节气室进气速度的高低，从而改变延时的时间。

时间继电器的电路符号比一般继电器复杂。触头有六种情况，尤其对常开触头延时断开，常闭触头延时闭合，要仔细领会。

时间继电器的安装与使用：

（1）时间继电器应按说明书规定的方向安装。无论是通电延时型，还是断电延时型，都必须使继电器在断电后释放时，衔铁的运动方向垂直向下，其倾斜度不得超过 5°。

（2）时间继电器的整定值，应预先在不通电时整定好，并在试车时校正。

（3）通电延时型和断电延时型可在整定时间内自行调换。

除空气阻尼式时间继电器外，还有直流电磁式时间继电器、电动式时间继电器 、电子式时间继电器等，这里就不再一一介绍了。

3．热继电器

按相数来分，热继电器有单相、两相和三相式三种类型。按功能来分，三相式的热继电器又有带断相保护装置和不带断相保护装置的。按复位方式分，热继电器有自动复位的和手动复位的，所谓自动复位是指触头断开后能自动返回。按温度补偿分，有带温度补偿的和不带温度补偿的。

常用的热继电器有 JR20、JR36、JRS1 系列，具有断相保护功能的热继电器系列，一般只能和相应系列的接触器配套使用，如 JR20 热继电器必须与 CJ20 接触器配套使用。热继电器的图形符号如图 8-52 所示，文字符号为 FR。



（a）热元件　　（b）常闭触头

图 8-52　热继电器图形符号

热继电器使用时，应将热元件串联在主电路中，常闭触头串联在控制电路中，当电动机过载时，流过电阻丝的电流超过热继电器的整定电流，电阻丝发热增多，温度升高，由于两块金属片的热膨胀程度不同，使主双金属片向右弯曲，通过传动机构推动常闭触头断开，分断控制电路，再通过接触器切断主电路，实现对电动机的过载保护。电源切除后，主双金属片逐渐冷却恢复原位。

热继电器的复位机构有手动复位和自动复位两种，可根据使用要求通过复位调节螺钉来自由调整选择。一般自动复位时间不超过 5min，手动复位时间不超过 2min。

在选用热继电器时应注意两点：第一，选择热继电器的额定电流等级时应根据电动机或其他用电设备的额定电流来确定。例如，电动机的额定电流为 8.4A，则可选用数值相近的 10A 等级的热继电器，使用时将整定电流调整到约 8.4A。第二，热继电器的热元件有两相和三相两种形式（老产品以两相为主），在一般的工作机械电路中，可选用两相的热继电器，但是当电动机作三角形连接并以熔断器作为短路保护时，则选用带断相保护装置的三相热继电器。

热继电器的整定电流值为（0.95～1.05A）电动机的额定电流。所谓整定电流，是指热继电器长期不动作的最大电流，超过此值就要动作。整定电流值应与被保护电动机额定电流值相等，其大小可通过旋转整定电流钮来实现。

8.5.6　主令电器

主令电器主要是用来接通和切断控制电路，以发布指令或信号，达到对电力传动系统的控

制或实现程序控制。主令电器只能用于控制电路，不能用于通断主电路。

主令电器种类很多，本节主要介绍控制按钮、万能转换开关、行程开关、接近开关和光电开关。

1．控制按钮

按钮是一种以短时接通或分断小电流电路的电器，它的触头允许通过的电流较小，一般不超过 5A。它不直接控制主电路的通断，而是通过控制电路的接触器、继电器、电磁启动器来操纵主电路。

按钮一般由按钮帽、复位弹簧、桥式动触头、静触头、支柱连杆及外壳等部分组成，其图形符号如图 8-53 所示，文字符号为 SB。

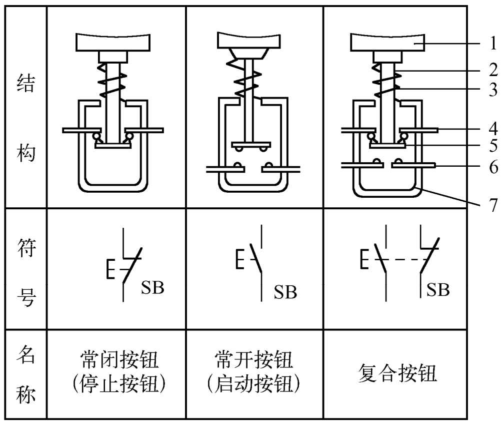


图 8-53　按钮的结构与符号

1—按钮帽；2—复位弹簧；3—支柱连杆；4—常闭静触头；5—桥式动触头；6—常开静触头；7—外壳

按钮按静态（不受外力作用）时触头的分合状态，可分为常开按钮（启动按钮）、常闭按钮（停止按钮）和复合按钮（常开、常闭组合为一体的按钮）。

常开按钮：未按下时，触头是断开的；按下时触头闭合；当松开后，按钮自动复位。

常闭按钮：与常开按钮相反，未按下时，触头是闭合的；当松开后，按钮自动复位。

复合按钮：将常开和常闭按钮组合为一体。按下复合按钮时，其常闭触头先断开，然后常开触头再闭合；而松开时，常开触头先断开，然后常闭触头再闭合。

2．万能转换开关

万能转换开关是一种多挡的转换开关，其特点是触点多，可以任意组合成各种开闭状态，能同时控制多条电路。主要用于各种配电设备的远距离控制，各种电气控制线路的转换、电气测量仪表的换相测量控制。有时也被用做小型电动机的控制开关。

万能转换开关的结构和组合开关的结构相似，由多组相同结构的触点组件叠装而成，它依靠凸轮转动及定位，用变换半径操作触头的通断，当万能转换开关的手柄在不同的位置时，触点的通断状态是不同的。万能转换开关的手柄操作位置是用手柄转换的角度表示的，有 90°、60°、45°、30°四种。

3．行程开关

行程开关又称位置开关或限位开关，其作用与按钮相同，用来接通或分断某些电路，达到一定的控制要求，利用机械设备某些运动部件的挡铁碰压行程开关的滚轮，使触点动作，将机械的位移信号——行程信号，转换成电信号，从而对控制电路发出接通、断开的转换命令。行程开关广泛应用于顺序控制、变换机械的运动方向、行程的长短和限位保护等自动控制系统中。

行程开关一般由操作头、触头系统和外壳三部分组成。操作头接受机械设备发出的动作指令和信号，并将其传递到触头系统。触头系统将操作头传递的指令或信号变成电信号，输出到有关控制电路，进行控制。



图 8-54　行程开关的图形符号

行程开关的结构形式很多，按其动作及结构可分为按钮式（又称直动式）、旋转式（又称滚轮式）、微动式三种，其图形符号如图 8-54 所示，文字符号为 SQ。

8.6　技能训练 9　白炽灯与日光灯等照明电路的安装

8.6.1　技能训练目标

（1）掌握安全用电的基础知识及常用电工工具的使用方法。
（2）了解常用照明电路器材的内部结构，掌握它们的固定和连接方法。
（3）了解导线规格及电工器材的选择，学会看懂简单的照明电路。
（4）掌握简单照明电路安装的一般操作规程。

8.6.2　技能训练仪器与器件

（1）电工装配工具套件。
（2）照明电路安装实验箱。

8.6.3　技能训练内容与步骤

（1）根据图 8-55 所示，配齐所用元器件，并进行质量检查。

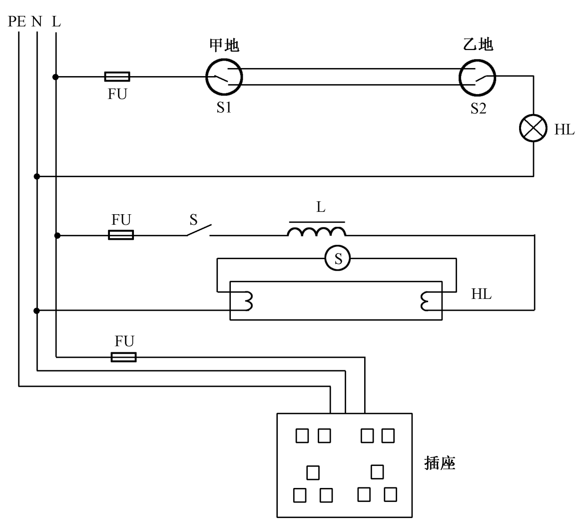


图 8-55　实验电路原理图

（2）在实训电路板上按图 8-56 所示安装所有的电器元器件。

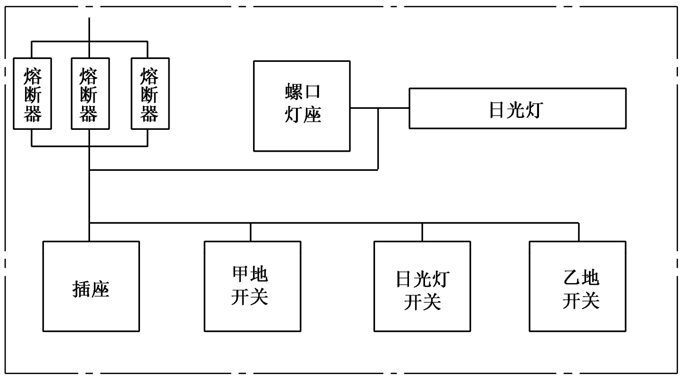


图 8-56　实训电路板

（3）按图 8-55 所示原理图进行布线。

（4）自检。安装完毕的控制线路板，必须按要求认真检查，确保正确无误。

（5）经指导老师同意并在现场监护时，学生可通电试验。并且根据图 8-57 日光灯点亮电流示意图，分析日光灯点亮过程中的电流流动的物理意义。

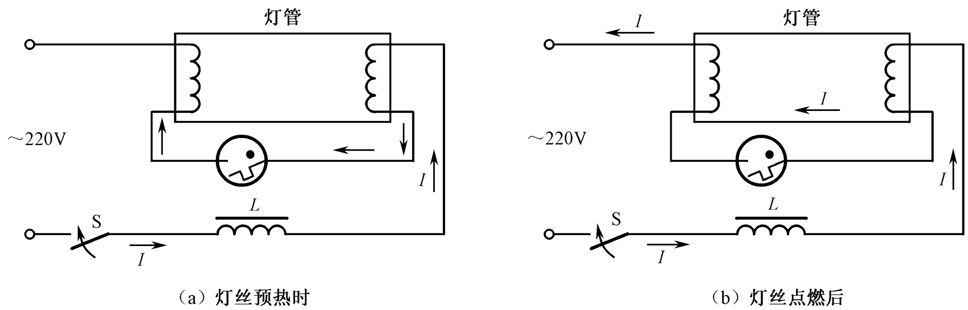


图 8-57　日光灯点亮电流示意图

（6）通电试验完毕后，切断电源。

8.6.4　注意事项

本实验照明电路的工作电压是 220V，做实验时，必须严格遵守以下规则。

（1）实验中严禁带电操作，连接线路时务必切断电源。

（2）安装完毕后先自查，然后必须经教师检查确认无误后，才能接入电源。

（3）实验器材和导线连接后，不允许有裸露的带电金属。

（4）保险丝型号规格配备要合适，且应串接在照明电源火线的最前端。

（5）开关与用电器串联，且应控制火线的接通或断开。

（6）用电器（包括电路中的插座）要跨接在火、零两线间。

（7）相线、零线要分清，保护线绝对不能接错，保持走线整齐。严禁相线与零线短接！

（8）电源相线用红色导线、控制线用黄色导线、零线用绿色或蓝色导线、保护线用黄绿双色线。

（9）实验完毕，务必切断电源后，再拆除实验连接线路，恢复原状。

8.6.5 创新能力的启发和培养

（1）试测量日光灯镇流器的等效电阻和等效电感值。

提示：可以先测量直流电阻，再用伏安法测量计算阻抗值，计算出等效的电感值。

（2）试用日光灯做电感性负载，再并联不同的电容器，采用三表法测量交流参数，分析提高功率因数的意义。

8.6.6 思考问题

（1）为了安全，日光灯电路输入电源的连线（相线和零线）应该怎样接？为什么？

（2）为什么日光灯为电感性负载？

（3）选择电子型的日光灯镇流器有什么好处？

8.6.7 实训要求

（1）在实训报告中绘制实验用电路板上的布线图。

（2）试叙述日光灯点亮过程的电路原理。

（3）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

8.7 技能训练 10 三相异步电动机绝缘电阻的测量及绕组首尾端的判断

8.7.1 技能训练目标

（1）掌握测量三相异步电动机绝缘电阻的方法。

（2）掌握判别三相异步电动机定子绕组的首尾端的方法。

（3）了解三相异步电动机定子绕组电阻的测量方法。

8.7.2 技能训练仪器和器件

（1）小型三相异步电动机。

（2）兆欧表；万用表。

（3）220/36V 变压器或自耦调压器。

（4）干电池、开关与连接导线。

8.7.3 技能训练内容与步骤

1．测量三相异步电动机绝缘电阻

（1）选用合适量程的兆欧表。

（2）测量前要先检查兆欧表是否完好。即在兆欧表未接上被测对象之前，摇动手柄使发电机达到额定转速（120r/min），观察指针是否指在标尺的“∞”位置。将接线柱“线”（L）端和“地”（E）端短接，缓慢摇动手柄，观察指针是否指在标尺的“0”位。如果指针不能指到相应的位置，表明兆欧表有故障，应检修后再用。

（3）用万用表的电阻挡，分别找出三相绕组各相的两个线头。给三相绕组的线头各相进行

假设编号，分别标记为 U1 和 U2、V1 和 V2、W1 和 W2。

（4）测量三相异步电动机的绝缘电阻。当测量三相异步电动机各相绕组之间的绝缘电阻时，将兆欧表“ L ”端和“ E ”端分别接两绕组的接线端；当测量各相绕组对地的绝缘电阻时，将“ L ”端接到绕组上，“ E ”端接机壳。接好线后开始摇动兆欧表手柄，摇动手柄的转速须保持基本恒定（约 120r/min），摇动一分钟后，待指针稳定下来再读数。将测得的数据填入表 8-1 中。

表 8-1　测量三相异步电动机绝缘电阻

相 间 绝 缘	绝 缘 电 阻	各相对地绝缘	绝 缘 电 阻
U 相与 V 相		U 相对地	
V 相与 W 相		V 相对地	
W 相与 U 相		W 相对地	

2．判别三相异步电动机定子绕组的首尾端

（1）用万用表检查方法一。

① 判断各相绕组的两个出线端。

用万用表电阻挡分清三相绕组各相的两个线头，并进行假设编号。

② 判断首尾端。按图 8-58 所示的方法接线，观察万用表（微安挡）指针摆动的方向，合上开关瞬间，若指针摆向大于 0 的一边，则接电池正极的线头与万用表负极所接的线头同为首端或尾端。如指针反向摆动，则接电池正极的线头与万用表正极所接的线头同为首端或尾端。

③ 再将电池和开关接另一相的两个线头进行测试，就可正确判别各相的首尾端。

（2）用万用表检查方法二。

① 判断各相绕组的两个出线端。

用万用表电阻挡分清三相绕组各相的两个线头，给各相绕组假设编号为 U1、U2、V1、V2 和 W1、W2。

② 按图 8-59 所示接线，判断首尾端。用手转动电动机转子，如万用表（微安挡）指针不动，则证明假设的编号是正确的，若指针有偏转，说明其中有一相首尾端假设编号不对，应逐相对调重测，直至正确为止。

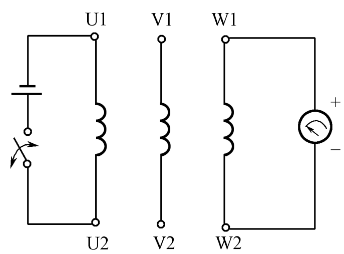


图 8-58　用万用表微安挡测试

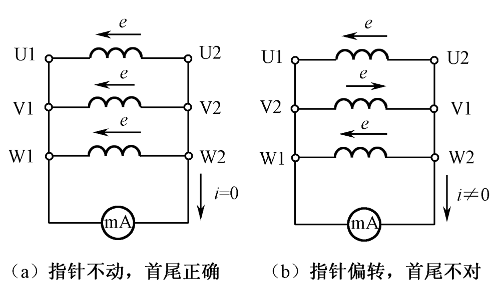


图 8-59　万用表判断绕组首尾

（3）方法三：低压交流电源法。

① 判断各相绕组的两个出线端。

用万用表电阻挡分清三相绕组各相的两个线头，并进行假设编号。

② 按图 8-60 所示接线。把其中任意两相绕组串联后再与电压表或万用表的交流电压挡连接，第三相绕组与 36V 低压交流电源接通。

③ 判断首尾端。通电后，若电压表无读数，说明连在一起的两个线头同为首端或尾端。

电压表有读数，连在一起的两个线头中一个是首端，另一个是尾端，任定一端为已知首端，同法可判定第三相的首尾端。

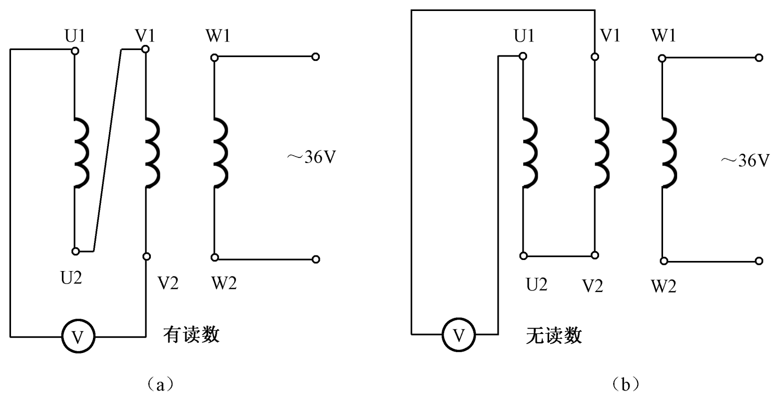


图 8-60　用低压交流电判断绕组首尾

8.7.4 注意事项

（1）测量三相异步电动机绝缘电阻时，绝对不允许在设备带电时用兆欧表测绝缘电阻；测量完毕，应对设备进行放电，否则容易引起触电事故。

（2）兆欧表未停止转动之前，禁止用手触及设备的测量部分或兆欧表的接线柱。拆线时，也不可触及引线的裸露部分。

8.7.5 创新能力的启发和培养

怎样检查三相交流异步电动机绕组的安放形式？

提示：试观察电机模型中定子三相绕组的布线，并绘出连线图。

8.7.6 思考问题

（1）为什么要判别三相异步电动机定子绕组的首尾端？

（2）试考虑二相定子绕组之间的绝缘电阻和绕组对外壳之间电阻有什么不同？

（3）试说明实训中测量定子绕组首尾端的几种方法的原理。

8.7.7 实训要求

（1）记录测量的绕组电阻和绝缘电阻值。

（2）记录判断绕组首尾端的 3 种测量的状况和有关数据（仪表摆动的刻度）。

（3）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 8

1．什么是照明电路？什么是照明电器？根据实际需要，照明通常可分为哪几种？

2．安装白炽灯的关键是什么？画出一只开关控制一盏灯和二只开关控制一盏灯的电路图。

3．日光灯主要由哪些部件组成？画出日光灯照明电路的电路图。

4. 什么是变压器的变比？确定变压器变比的方法有哪几种？

5. 使用电压互感器和电流互感器时应注意哪些问题？

6. 三相异步电动机由哪几部分组成？其中定子和转子的作用是什么？怎样改变三相异步电动机的转向？白炽灯照明电路的维修方法和常见故障检修照明线路在运行中，会因为各种原因而出现故障，如线路老化、电气组件故障（开关、灯座、灯泡、插座）等。

（1）维修基本操作步骤。

① 了解故障现象：在维修时首先应了解故障现象，这是保证整个维修工作能否顺利进行的前提。了解故障现象可通过询问当事人、观察故障现象等手段获得。

② 故障现象分析：根据故障现象，利用电路图及布置图进行分析，确定可能造成故障的大致范围，为检修提供方案。

③ 检修：通过检修手段，如用验电笔、万用表等工具检测确定故障点，针对故障组件或线路进行维修或更换。

（2）白炽灯的常见故障及检修。

① 灯泡不亮。

故障原因：可能是灯泡钨丝烧断；灯头（座）、开关接触不良或者线路中有断路现象。

处理方法：灯泡损坏更换灯泡；接触不良可拧紧松动的螺栓或者更换灯头或开关；若线路断路，则检查并找出线路断开点（包括熔丝），接通线路。

② 合上开关即烧断熔丝。

故障原因：线路短路。检查灯头接线，查看灯头内中心铜片与外螺丝是否短路；灯头接线是否松脱碰到一起；检查线路有无绝缘损坏；估算负载是否熔丝容量过小等。

处理方法：处理好灯头上的短路点；若线路老化，根据情况处理绝缘或更新新线；如果是负载过重则减轻负载或加大熔断器的容量。

③ 灯泡忽亮忽暗（熄灭）。

故障原因：线路接触不良

处理方法：检查开关、灯头熔断器等处的接线是否松动；用万用表检查电源电压是否波动过大。拧紧松动的接头；电压波动无需处理。

④ 灯泡发出强烈白光或灯光暗淡。

故障原因：灯泡工作电压与电源电压不相符。

处理方法：更换与电源电压相符的灯泡。

（3）日光灯照明电路的常见故障及检修。

① 荧光灯不发光。

故障原因：可能是接触不良、启辉器损坏或荧光灯灯丝已断、镇流器开路等引起的。

处理方法：如属接触不良时，可转动灯管、压紧灯管与灯座之间的接触、转动启辉器使线路接触良好；如属启辉器损坏，可取下启辉器用一根导线的两金属头同时接触启辉器座的两弹簧片取开后荧光灯应发亮，这说明启辉器已损坏，应更换启辉器；如荧光灯灯丝已断、镇流器开路，可用万用表检查通断情况，根据检查情况进行更换修理。

② 灯管两端发光但不能正常工作。

故障原因：可能是启辉器损坏、电压过低、灯管陈旧或气温过低等引起的。`

处理方法：更换启辉器或陈旧的灯管；若电压过低则无需处理，待电压正常后正常工作；若气温过低时，可加保护罩提高温度。

③ 灯光闪烁。

故障原因：是新灯管属质量不好或旧灯管属灯管陈旧引起的。

处理方法：更换灯管。

④ 灯管亮度降低。

故障原因：是灯管陈旧（灯管发黄或两端发黑）、电压偏低等引起的。

处理方法：更换灯管；若电压偏低则无需处理。

⑤ 灯管发光后在管内旋转或灯管内两端出现黑斑。

故障原因：光在管内旋转是某些新灯管出现的暂时现象，灯管内两端出现黑斑是管内水银凝结造成的。

处理方法：若灯管发光后在管内旋转，则开关几次即可消失；灯管内两端出现黑斑，启动后可以蒸发消除。

⑥ 日光灯工作时噪声大。

故障原因：镇流器质量较差、硅钢片振动造成的。

处理方法：更换镇流器。

⑦ 镇流器过热、冒烟。

故障原因：是镇流器内部线圈匝间短路或散热不好。

处理方法：更换镇流器。

⑧ 合上日光灯开关，灯管闪亮后立即熄灭。

故障原因：镇流器内部线圈匝间短路。

处理方法：更换镇流器。

教学微视频

扫一扫

第 9 章　三相异步电动机的基本控制

【本章学习目标】

1. 理解电气图常用图形符号和文字符号、电气控制线路的组成、电气原理图的绘制规则。

2. 了解三相异步电动机直接启动控制、接触器自锁正转控制、具有过载保护的自锁正转控制及连续点动混合控制的正转控制线路的组成和工作原理。

3. 掌握三相异步电动机接触器互锁正、反转控制电路的组成和工作原理，理解接触器、按钮双重连锁的正、反转控制线路的组成和工作原理。

4. 会识读简单的电气控制线路原理图，了解常用的几种工作机械的电气控制线路的组成和工作原理。

5. 了解现代控制技术中的可编程控制器及其应用、变频器及其应用、传感器及其应用。

【教学目标】

1. 知识目标：了解电气控制原理图的有关知识电气原理图的绘制规则，理解三相异步电动机基本控制电路的组成和工作原理。

2. 能力目标：通过理论知识的学习，培养实践操作能力。

【教学重点】

三相异步电动机基本控制电路的组成和工作原理。

【教学难点】

电气控制线路原理图的识读。

【教学方法】

分析法、多媒体教学、演示法、实验法。

9.1　电气控制原理图的有关知识*

9.1.1　电气控制线路的组成

1. 电气控制原理图的有关知识

工作机械的电气控制线路可用电气原理图表示，原理图是用图形符号、文字符号和线条表明各个电器元器件的功能及连接关系和电路的具体安排的示意图。电气原理图使用广泛，它可以描述千差万别的对象，使用时不受对象实际大小和复杂程度的限制。

电气原理图是用国家统一规定的图形符号和文字符号表示各个电器元器件的连接关系和电气控制线路的工作原理的图形。电气原理图结构简单，层次分明，便于阅读和分析电路的工作原理。图上的符号必须采用国家标准 GB 4728—85《电气图用图形符号》所规定的图形符号和文字符号来绘制，因此，在识读电气原理图前，必须熟悉、理解国家标准《电气图用图形符

号》，需要时应随时查阅。

1）电气图的分类

按国家标准 GB 6988—86《电气制图》规定，电气技术领域中电气图有以下几种。

（1）系统图或框图：用符号或带注解的框，概略表示系统或分系统的基本组成、相互关系及主要特征的一种简图。

（2）功能图：表示理论与理想的电路而不涉及方法的一种简图。

（3）逻辑图：主要用二进制逻辑单元图图形符号绘制的一种简图。

（4）电路图：用图形符号并按工作顺序排列，详细表示电路、设备或成套装置的全部组成和连接关系，而不考虑实际位置的一种简图。

（5）接线图：表示成套装置的连接关系，用以进行接线盒检查的一种简图。

（6）程序图：详细表示程序单元和程序片及其互连关系的一种简图。

（7）端子接线图：表示成套装置或设备的端子以及接在端子上的外部接线的一种接线图。

（8）位置简图：表示成套装置、设备或装置中各个项目的位置的一种简图或一种图。

2）电气制图规则

国际标准 GB 6988—86《电气制图》规定了电气技术领域中图的编制方法，规定了《电气制图》的一般规则。关于图纸幅面、格式、图幅区、图线等要求，需要时可查阅国标。

2．电气图常用图形符号及文字符号

1）文字符号

文字符号是以文字形式作为代码或代号，表明项目种类和线路的特征、功能、状态或概念，可标注在电气设备、装置和元器件上或其图形符号的近旁。文字符号可分基本文字符号和辅助文字符号，基本文字符号又分单字母符号和双字母符号。

文字符号的使用：电气技术的文字符号一般不用于电气产品的型号编制与命名。

2）图形符号

图形符号是在图样和技术文件中使用的一种特殊的工程语言，用图形、标记或字符的形象化和示意化表示，它可以代表实物，也可以代表概念，是绘制和识读电气制图的基础知识。其用途主要是在图样和其他技术文件中用来表示一个设备或概念的图形、标记或字符。

图形符号的基本形式：符号要素、一般符号、限定符号和方框符号。一般符号和限定符号最为常用。

（1）符号要素：是一种具有确定意义的最简单的基本图形，通常表示项目的特性功能，即表示电器元器件的轮廓或外壳。它不能单独使用，必须与其他符号组合在一起，形成完整的图形符号。

（2）一般符号：是表示某一类产品项目及其共同特征功能且广泛适用的简单符号。一般符号既可以直接应用，也可加上限定符号使用。

（3）限定符号：是指用来提供附加信息的一种加在其他图形符号上的符号，它一般不能单独使用。

（4）方框符号：是用正方形或矩形轮廓框表示较复杂电气装置或设备的简化图形。它一般高度概括其组合，不给出内部器件、零部件及其连接细节，而在框内用限定符号、文字符号等与其共同表示某产品的特征功能。

3）图形符号的绘制原则

（1）图形符号是按无电压、无外力作用的常态下给出的，绘制的标准图形符号中的文字、

物理量、化学元素符号等应视为图形符号的组成部分。

（2）国家标准对图形符号的绘制尺寸并没有做统一规定。在实际绘图中，应根据具体电气图的图幅情况缩小或放大，并尽量使符号各部分之间的比例适当，但是符号各组成部分的比例、相互之间的位置应保持不变。

（3）图形符号的布置一般为水平或垂直位置，只要不改变符号的含义，不引起混淆，可根据电气图布线的需要，将整个图形符号旋转（90°、180°、270°）或镜像放置；但作为图形符号一部分的文字符号、指示方向及其某些限定符号的位置不能随之旋转，应遵循有关规定。

（4）符号的连接线一般不作为符号的组成部分，但作为电气图连接线又是不可缺少的。因此可根据实际情况省略或增补连接线，也可调整连接线的位置方向，但在改变连接线的位置方向后，一定要注意，不得改变符号的含义。

（5）在绘制电气图选用图形符号时，应尽量选用标准中给出的“优选形”图形符号，在同一张图或同一套图中，同类符号只能选用同一种形式的图形符号。

9.1.2 电气原理图的绘制规则

1．绘制电气原理图应遵守的基本原则

（1）电气原理图包括主电路和辅助电路两部分。主电路是从电源到电动机的大电流通过的路径，一般从电源开始，经过电源引入的刀开关（或组合开关）、熔断器、接触器的主触点、热继电器的热元器件到电动机。辅助电路包括控制电路、信号回路、保护电路和照明电路。辅助电路中经过的电流比较小，一般不超过 5A。控制电路一般由熔断器、主令电器（如按钮）、接触器的线圈及辅助触点、继电器线圈和触点、热继电器的常闭触点、保护电器的触点等组成。信号回路主要由接触器的辅助触点、继电器的触点和信号灯等组成。

（2）在电气原理图中，电器元件采用展开的形式绘制，如属于同一接触器的线圈和触点分开来画，但同一元件的各个部件必须标以相同的文字符号。电气原理图包括所有电器元件的导电部件和接线端子，但并不是按照各电器元件的实际位置和实际接线情况绘制的。

（3）电气原理图中所有的电器元件必须采用国家标准中规定的图形符号和文字符号。属于同一电器的各个部件要用同一个文字符号表示。当使用多个相同类型的电器时，要在文字符号后面标注不同的数字序号。

（4）电气原理图中所有电器设备的触点均在常态下绘出，所谓常态，是指电器元件没有通电或没有外力作用时的状态，此时常开触点断开，常闭触点闭合。

（5）电气原理图的布局安排应便于阅读分析。采用垂直布局时，动力电路的电源线绘成水平线，主电路应垂直于电源电路画出。控制回路和信号回路应垂直地画在两条电源线之间，耗能元器件（如线圈、电磁铁、信号灯等）应画在电路的最下面，且交流电压线圈不能串联。

（6）在原理图中，各电器元件应按动作顺序从上到下，从左到右依次排列，并尽量避免线条交叉。有直接电联系的导线的交叉点，要用黑圆点表示。

（7）在原理图的上方，将图分成若干图区，从左到右用数字编号，这是为了便于检索电气线路，方便阅读和分析。图区的编号下方的文字表明它对应的下方元件或电路的功能，以便于理解电路的工作原理。

（8）在电气原理图的下方附图表示接触器和继电器的线圈与触点的从属关系。在接触器和继电器的线圈的下方给出相应的文字符号，文字符号的下方要标注其触点的位置的索引代号，对未使用的触点用“×”表示。对于接触器左栏，表示主触点所在的图区号，中栏表示辅助常

开触点所在的图区号，右栏表示辅助常闭触点所在的图区号（对于继电器左栏表示常开触点所在的图区号，右栏表示常闭触点所在的图区号），如图 9-1 所示。

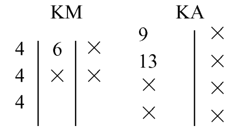


图 9-1　触点的图区号

2．电器元件布置图

电器元件布置图主要用来表明在控制盘或控制柜中电器元件的实际安装位置。图中的各电器的代号应与电气原理图和电器清单上元件代号相同。如图 9-2 所示为 CW6132 型普通车床的电器元件布置图。

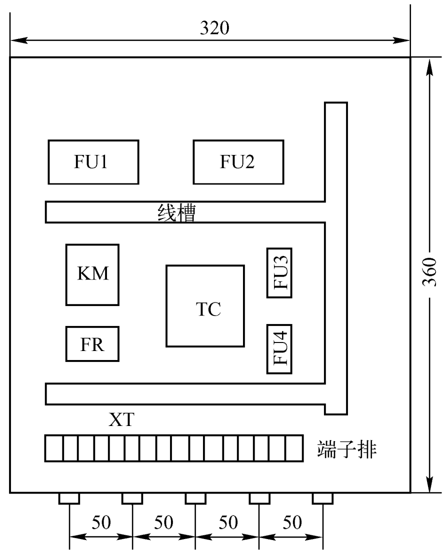


图 9-2　车床电器元件布置图

3．电气接线图

电气接线图用来表明电气控制线路中所有电器的实际位置，标出各电器之间的接线关系和接线去向。接线图主要用于安装电气设备和电器元件时进行配线。如图 9-3 所示为车床的互连接线图。

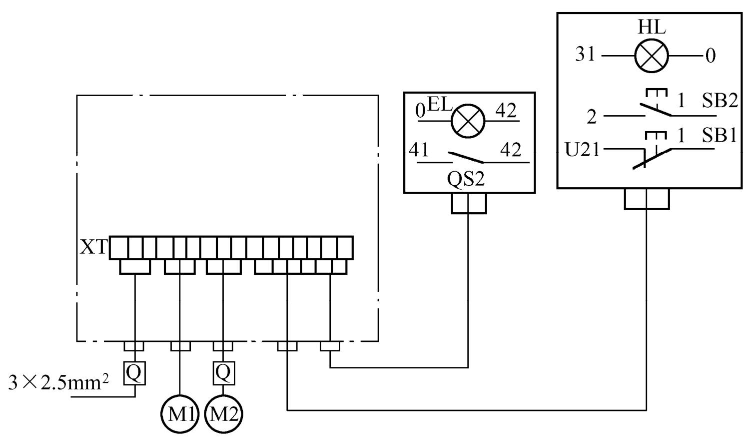


图 9-3　车床的互连接线图

接线图根据表达对象和用途不同，可以分为单元接线图、互连接线图和端子接线图。

单元接线图表示单元内部的连接关系，不包括单元之间的外部连接，应根据位置图布置各个电器元件，根据电器位置布置最合理、连接导线最经济的原则绘制。

4．绘制接线图时应注意的问题

（1）在接线图中，各电器以国家标准规定的图形符号代表实际的电器，各电器的位置与实际安装位置一致。一个元件的所有部件应画在一起，并用虚线框起来。

（2）接线图中的各电器元件的图形符号及文字符号必须与原理图完全一致，并要符合国家标准。

（3）各电器元件上凡是需要接线的部件端子都应绘出，并且一定要标注端子编号，各接线端子的编号必须与原理图上相应的线号一致；同一根导线上连接的所有端子的编号应相同，即等电位点的标号相同。

（4）同一控制盘上的电器元件可以直接连接，而盘内和外部元件连接时必须经过接线端子排进行，走向相同的相邻导线可绘成一股线。在接线图中一般不表示导线的实际走线途径，施工时由操作者根据实际情况选择最佳的走线方式。

9.2　三相笼型异步电动机的正转控制线路

9.2.1　点动正转控制线路

点动正转控制线路是一种调整工作状态，要求是一点一动，即按一次按钮动一下，连续按则连续动，不按则不动，这种动作常称为“点动”或“点车”。这种控制方法常用于电动葫芦的起重电动机控制和车床拖板箱快速移动电动机控制。

1．电气原理图

点动正转控制线路如图 9-4 所示。

2．电路中的元器件及其作用

- 隔离开关 QS：在电路中的作用是隔离电源，便于检修；
- 熔断器 FU1：主电路的短路保护；
- 熔断器 FU2：控制电路的短路保护；
- 交流接触器 KM：主触头控制电动机的启动与停止；
- 启动按钮 SB：控制接触器 KM 的线圈得电与失电。

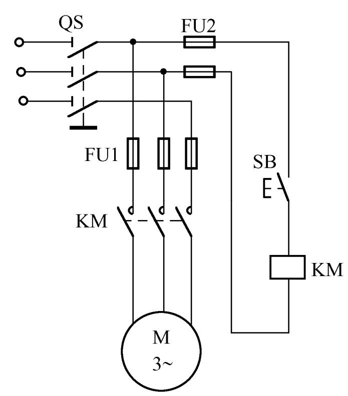


图 9-4　点动正转控制线路原理图

3．工作原理

在合上 QS 的状态下：

启动：按下 SB⟶KM 线圈得电⟶KM 主触头闭合⟶电动机 M 通电启动；

停止：松开 SB⟶KM 线圈失电⟶KM 主触头断开⟶电动机 M 断电停转。

9.2.2 接触器自锁正转控制线路

在要求电动机启动后能连续运转时，采用点动正转控制线路显然是不行的。为实现电动机的连续运转，可采用如图 9-5 所示的接触器自锁正转控制线路。

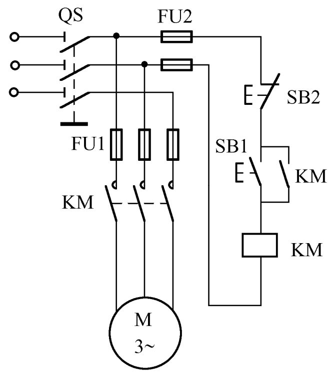


图 9-5　接触器自锁正转控制线路原理图

1．电气原理图

电气原理图如图 9-5 所示。

2．电路中的元器件及其作用

隔离开关 QS：在电路中的作用是隔离电源，便于检修。

熔断器 FU1：主电路的短路保护。

熔断器 FU2：控制电路的短路保护。

交流接触器 KM：主触头控制电动机的启动与停止，辅助常开触头在电路中起到失压（零压）保护和欠压保护的作用。

所谓失压保护，就是指电动机在正常的运行中，由于外界某种原因引起突然断电时，能自动断开电动机电源，当重新供电时，保证电动机不能自行启动的一种保护。

所谓欠压保护，就是指当控制电路的电压低于线圈额定电压 85%以下时，主触头和辅助常开触头同时分断，自动切断主电路和控制电路，电动机失电停转。

启动按钮 SB1：控制接触器 KM 线圈的得电。

停止按钮 SB2：控制接触器 KM 线圈的失电。

3．工作原理

启动：按下SB1 → KM线圈得电 → KM主触头闭合 / KM辅助常开触头闭合 → 电动机启动运转

停止：按下SB2 → KM线圈失电 → KM主触头分断 / KM辅助常开触头分断 → 电动机失电停转

由该电路的工作原理可以知道：电路启动后，当松开 SB1 时，因为交流接触器 KM 的辅助常开触头闭合时已将 SB1 短接，控制电路仍保持接通，所以交流接触器 KM 的线圈继续得电，电动机实现连续运转。像这样当松开启动按钮后，交流接触器通过自身常开触头而使线圈保持得电的作用称为自锁。与启动按钮并联起自锁作用的常开触头称为自锁触头。

9.2.3 具有过载保护的自锁正转控制线路

上述线路由熔断器 FU 做短路保护，由接触器 KM 做欠压和失压保护，但在实际应用中还是不够的。因为电动机在运行过程中，如果长期负载过大或启动操作频繁，或者缺相运行等原因，都可能使电动机定子绕组的电流增大，超过其额定值。而电路在这种情况下，熔断器往往并不能立即熔断，从而引起电动机的定子绕组过热，缩短电动机的寿命，严重时甚至会使电动机的定子绕组烧毁。因此实际应用中对电动机还应采取过载保护措施。

所谓过载保护就是指当电动机出现过载时，能自动切断电动机电源，使电动机停转。电动机常用的过载保护是由热继电器来实现的，电路如图 9-6 所示。在接触器自锁正转控制线路中加入一个热继电器 FR，使热继电器的热元件串接在主电路中，热继电器的常闭触头串接在控制电路中，这就构成了具有过载保护的自锁正转控制线路。该电路的工作原理及如何起到过载保护的，请读者自行分析。

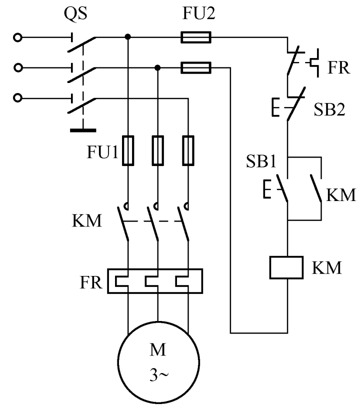


图 9-6 具有过载保护的自锁正转控制线路原理图

9.2.4 连续与点动混合控制的正转控制线路

机床设备在正常工作时，一般需要电动机处在连续运行状态；但在试车或调整刀具与工件的相对位置时，又需要电动机能点动控制，实现这种工艺要求的电路称为连续与点动混合控制的正转控制电路，如图 9-7 所示。

1. 电气原理图

由图 9-7 可知，该电路是在具有过载保护的自锁正转控制线路的基础上，增加了一个复合按钮 SB3，其常开触头与启动按钮并联，常闭触头与自锁触头串联。

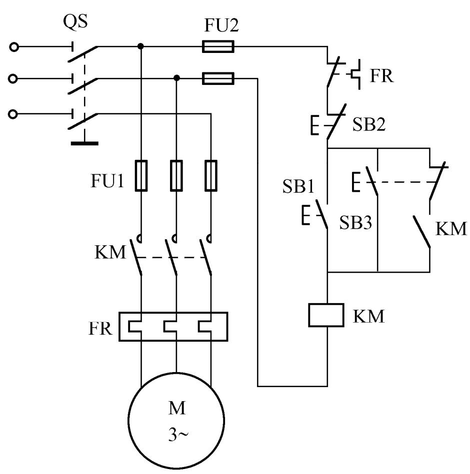


图 9-7 连续与点动混合控制的正转控制线路

2．工作原理

1）连续控制

状态为合上 QS。

启动：按下SB1 → KM线圈得电 → KM主触头闭合、KM辅助常开触头闭合 → 电动机启动运转

停止：按下SB2 → KM线圈失电 → KM主触头分断、KM辅助常开触头分断 → 电动机失电停转

2）点动控制

状态为合上 QS。

启动：按下SB3 → SB3常闭触头先分断，切断自锁电路；SB3常开触头后闭合 → KM线圈得电 → KM自锁触头闭合；KM主触头闭合 → 电动机失电停转启动运转

停止：松开SB3 → SB3常开触头先恢复分断 → KM线圈失电 → KM自锁触头分断、KM主触头分断 → 电动机失电停转；SB3常闭触头后恢复闭合（此时KM自锁触头已分断）

9.3　三相笼型异步电动机的正反转控制线路

正转控制线路只能使电动机朝一个方向旋转，但在生产实践中，许多生产机械往往要求运动部件能向正、反两个方向运动，从而实现可逆运行。如铣床的主轴要求正反旋转，工作台要求往返运动，起重机的吊钩要求上升与下降等。从电动机的工作原理可知，只要改变电动机定子绕组的电源相序，就可以实现电动机的反转。在实际应用中，通常通过两个接触器来改变电源的相序，从而实现电动机的正、反转控制。

9.3.1　接触器连锁的正、反转控制线路

1．电气原理图

接触器连锁的正、反转控制线路如图 9-8 所示。

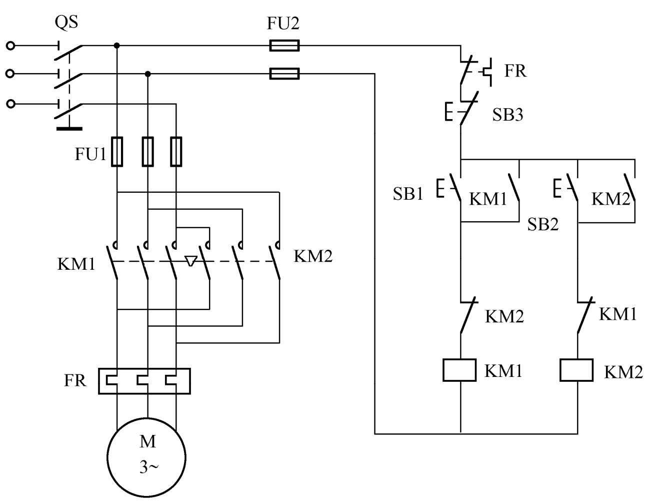


图 9-8　接触器连锁的正、反转控制线路

2．电路中的元件及其作用

隔离开关 QS：在电路中的作用是隔离电源，便于检修。

熔断器 FU1：主电路的短路保护。

熔断器 FU2：控制电路的短路保护。

交流接触器 KM1：主触头控制电动机的正转启动与停止，辅助常开触头在电路中起到失压（零压）保护和欠压保护的作用，辅助常闭触头与交流接触器 KM2 的辅助常闭触头构成连锁，使得 KM1 线圈和 KM2 线圈不能同时得电。

交流接触器 KM2：主触头控制电动机的反转启动与停止，辅助常开触头在电路中起到失压（零压）保护和欠压保护的作用，辅助常闭触头与交流接触器 KM1 的辅助常闭触头构成连锁，使得 KM1 线圈和 KM2 线圈不能同时得电。

注意：接触器 KM1 和 KM2 的主触头绝不允许同时闭合，否则将造成两相电源短路。为了避免两个接触器 KM1 和 KM2 同时得电动作，就在正、反转控制电路中分别串接了对方接触器的一对常闭触头，这样当一个接触器得电动作时，通过其常闭触头使另一个接触器不能得电动作，接触器间这种相互制约的作用称为接触器连锁（或互锁）。实现连锁作用的常闭触头称为连锁触头（或互锁触头），连锁符号用“ ▽ ”表示。

热继电器 FR：在电路中起过载保护作用。

正转启动按钮 SB1：控制接触器 KM1 线圈的得电。

反转启动按钮 SB2：控制接触器 KM2 线圈的得电。

停止按钮 SB3：控制接触器 KM1 线圈和 KM2 线圈的失电。

3．工作原理

在合上 QS 的状态下进行。

1）正转控制

按下SB1 → KM1线圈得电 →
- → KM1常开自锁触头闭合
- → KM1主触头闭合
- → KM1常闭触头分断，断开KM2线圈回路

→ 电动机M正转

2）反转控制

按下SB3 → KM1线圈失电 →
- → KM1常开自锁触头恢复断开，解除自锁
- → KM1主触头分断
- → KM1常闭触头恢复闭合，解除对KM2的连锁

（KM1常开自锁触头恢复断开，解除自锁；KM1主触头分断）→ 电动机M失电停转

再按下SB2 → KM2线圈得电 →
- → KM2常开自锁触头闭合
- → KM2主触头闭合
- → KM2常闭触头分断，断开KM1线圈回路

→ 电动机M反转

3）停止控制

按下SB3 → KM1或KM2线圈失电 → KM1或KM2主触头分断 → 电动机M失电停转

9.3.2 接触器、按钮双重连锁的正、反转控制线路*

接触器连锁正、反转控制电路的优点是工作可靠；缺点是操作不便，当电动机从正转变为反转时，必须先按下停止按钮后，才能按反转启动按钮，否则由于接触器的连锁作用，不能实现反转。为了克服这种操作不便的缺点，把正转按钮 SB1 和反转按钮 SB2 换成两个

复合按钮，并使这两个复合按钮的常闭触头分别串接在对方的常开触头电路中，这就构成了接触器、按钮双重连锁的正、反转控制线路，如图 9-9 所示。该电路的工作原理请读者自行分析。

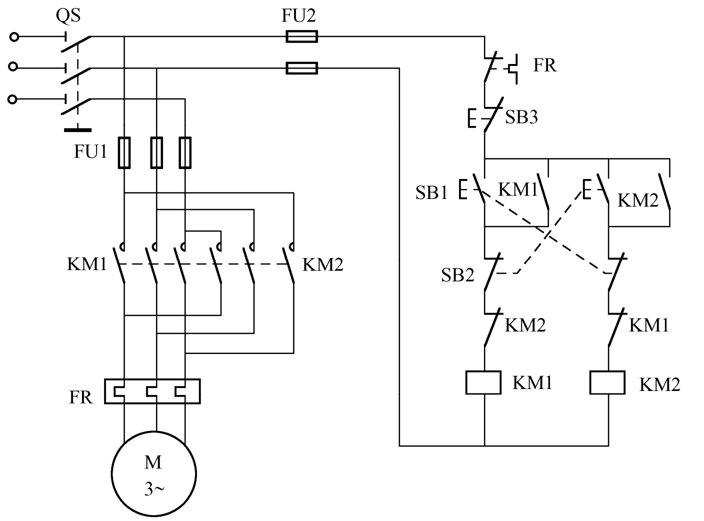


图 9-9　接触器、按钮双重连锁的正、反转控制线路

9.4　几种工作机械的电气控制线路简介*

9.4.1　识读电气控制线路原理图的方法

电气控制线路原理图具有结构简单、层次分明、适于研究和分析电路的工作原理等优点，所以无论在设计部门还是在生产现场，都得到了广泛的应用。识读电气控制线路原理图的方法一般可归纳为：从机到电，先主后辅，化整为零，顺序阅读，连成系统，统观全图。其具体方法如下：

（1）看标题栏，了解电路图的名称及标题栏中的有关内容，对电路图有个初步的认识。

（2）看主电路，了解主电路中采用的控制电器和设备，以及主电路结构及其如何满足拖动控制要求。再根据工艺过程了解各台用电设备之间的联系。

（3）看控制电路，根据主电路中控制元件主触头的文字符号，找到控制电路中有关的控制支路，把整个控制电路分解成与主电路相对应的几个基本环节，逐一分析。在分析中，特别要注意各环节之间的相互联系和制约关系，如自锁、连锁、保护环节等，以及与机械、液压部件的动作关系。逐步分析结束后，还应把各环节串起来，从整个控制电路来理解。

（4）最后看信号、照明等辅助电路。

弄清了电气控制线路原理图的布局、结构及大致工作情况后，即可结合前面我们所学的专业知识来分析电路的工作原理了。

9.4.2　CA6140 卧式车床电气控制线路

车床是机械加工中应用最广泛的金属切削机床，而在各种车床中，使用最多的又是普通车

床。CA6140 是普通精度级车床，它的加工范围广、性能优越、结构先进、操作方便。

1．主要结构及运动形式

CA6140 型普通车床主要由床身、主轴箱、进给箱、溜板箱、刀架、丝杠、光杠、尾架等部分组成，图 9-10 是该车床的外形图。其中主轴箱的作用是使主轴获得不同级别的正、反转转速，进给箱的作用是变换被加工螺纹的种类和导程，以获得所需的各种进给量，溜板箱的作用是将丝杠或光杠传来的旋转运动转变成直线运动等带动刀架进给。

CA6140 型普通车床的主运动是卡盘的旋转运动；进给运动是刀架带动刀具的直线运动；辅助运动是车床上除切削运动以外的其他一切必需的运动，如尾架的纵向移动、工件的夹紧与放松等。

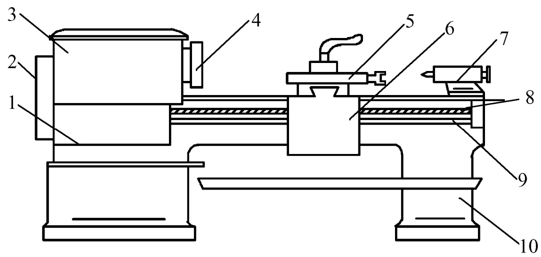


图 9-10　CA6140 型车床的外形图

1—进给箱；2—挂轮箱；3—主轴变速箱；4—卡盘；5—溜板与刀架；
6—溜板箱；7—尾架；8—丝杠；9—光杠；10—床身

2．电力拖动和控制特点

（1）主运动和进给运动由一台主轴电动机拖动，一般选用三相笼型异步电动机，不进行电气调速。

（2）主轴正、反转由操作手柄通过双向多片摩擦离合器控制，制动采用机械制动，调速采用齿轮箱进行机械有级调速。为了减小振动，主轴电动机通过几条 V 带将动力传递到主轴箱。

（3）主轴电动机的启动与停止采用按钮操作。

（4）刀架的快速移动由一台电动机拖动，采用点动控制。

（5）冷却泵电动机要求在主轴电动机启动后，方可决定冷却泵开动与否，当主轴电动机停止时，冷却泵电动机应立即停止。

（6）具有安全的局部照明装置和过载、短路、欠压和失压保护。

3．电路分析

CA6140 型普通车床的电气控制原理图如图 9-11 所示。为了便于检索的阅读，一般将机床电气原理图分成若干个图区。电路图的顶部为用途区，按各电路的功能分区；电路图的底部为数字区，按各支路的排列顺序分区。接触器线圈和继电器线圈所驱动的触点在图中的位置均以简表的形式列于各线圈的图形符号下，其标记方法如表 9-1 和表 9-2 所示。

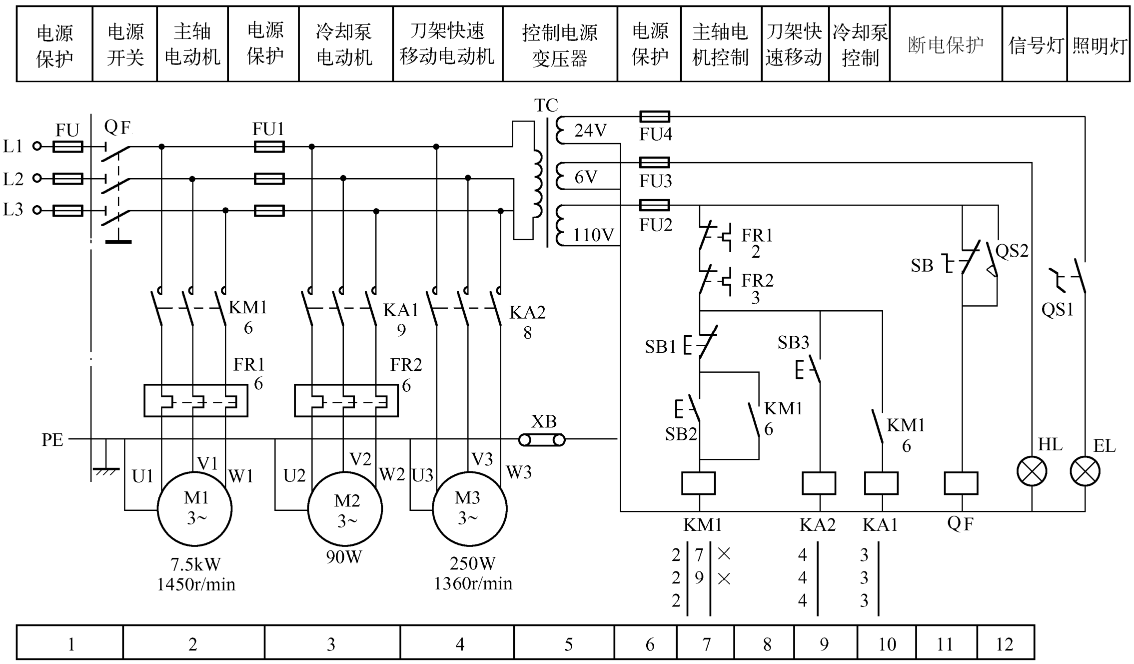


图 9-11　CA6140 型普通车床的电气控制原理图

表 9-1　接触器触点分区位置简表

栏　　目	左　　栏	中　　栏	右　　栏
触头类型	主触头所处的图区号	辅助常开触头所处的图区号	辅助常闭触头所处的图区号
举例 KM 2 | 8 | × 2 | 10 | × 2 | |	表示 3 对主触头均在图区 2	表示 1 对辅助常开触头在图区 8，另 1 对辅助常开触头在图区 10	表示 2 对辅助常闭触头未用

表 9-2　继电器触点分区位置简表

栏　　目	左　　栏	右　　栏
触头类型	常开触头所处的图区号	常闭触头所处的图区号
举例 KA2 4 | 4 | 4 |	表示 3 对常开触头均在图区 4	表示常闭触头未用

1）主电路分析

主电路有三台电动机，M1 是主轴运动和进给运动的电动机；M2 是冷却泵电动机，实现刀具供给冷却液，使刀具在加工过程中得到冷却；M3 是刀架快速移动电动机。M1、M2 和 M3 分别由接触器 KM 和中间继电器 KA1、KA2 控制。M1 与 M2 做长期工作，分别对热继电器 FR1 和 FR2 做过载保护，M3 做短时工作，可不设过载保护。FU1 为冷却泵电动机 M2、快速移动电动机 M3、控制变压器 TC 的短路保护。自动空气开关 QF 中的电磁脱扣器对电路进行短路保护。

2）控制电路分析

控制电路的电源由控制变压器 TC 二次侧输出 110V 电压供电。在正常工作时，位置开关 SQ1 的常开触头闭合。打开床头皮带罩后，SQ1 断开，切断控制电路的电源，以确保人身安全。钥匙开关 SB 和位置开关 SQ2 在正常工作时是断开的，自动空气开关 QF 线圈不通电，自动空气开关 QF 能合闸。打开配电盘壁龛门时，位置开关 SQ2 闭合，自动空气开关 QF 线圈获电，自动空气开关 QF 自动断开。

控制电路的工作原理：合上自动空气开关 QF，变压器 TC 副边输出 110V、24V 和 6V 电压，此时指示灯 HL 亮，表示电路已接通电源。

按下主轴电动机的启动按钮 SB2，接触器 KM 通电（正常进给时，进给运动的限位开关 SQ1 处于接通状态）。接触器 KM 的线圈得电，接触器 KM 的主触头合上，主轴电动机 M 通电运转。同时接触器 KM 的辅助常开触头闭合，一方面实现自锁，另一方面为中间继电器 KA1 得电作准备。按压 SB1，接触器 KM 断电释放，电动机 M1 断电停转。

主轴电动机 M1 和冷却泵电动机 M2 在控制电路中采用顺序控制。即只有当主轴电动机 M1 启动后，合上旋钮开关 SB4，冷却泵电动机 M2 才能启动。当 M1 停止运行时，M2 自行停止。

刀架快速移动电动机 M3 的启动是由安装在进给操作手柄顶端的按钮 SB3 控制的，它与中间继电器 KA2 组成点动控制线路。

3）保护电路的分析

位置开关 SQ1 是机床的进给限位保护，当进给超出极限时，SQ1 分断，控制电路断电，电动机 M1、M2 和 M3 停转。

4）照明及指示电路分析

EL 为车床的低压照明灯，其工作电压为 24V，由变压器 TC 供给，由手动开关 SA 控制。HL 为电源信号灯，其工作电压为 6V，也由变压器 TC 供给。HL 亮，表示控制电路的电源工作正常，HL 不亮，表示电源有故障。

9.4.3 电动葫芦的电气控制线路

电动葫芦，简称电葫芦，又名电动提升机，如图 9-12 所示。它保留了手拉葫芦轻巧方便的特点，由电动机、传动机构和卷筒或链轮组成。电动葫芦是一种用途十分广泛的轻、小型起重设备。其特点是体积小，重量轻，承载能力大，常被安装在电动单梁桥门起重机和悬挂式起重机上，用来升降和运移物品。如图 9-13 所示为电动葫芦控制线路。

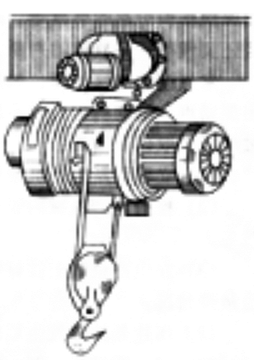


图 9-12　电动葫芦

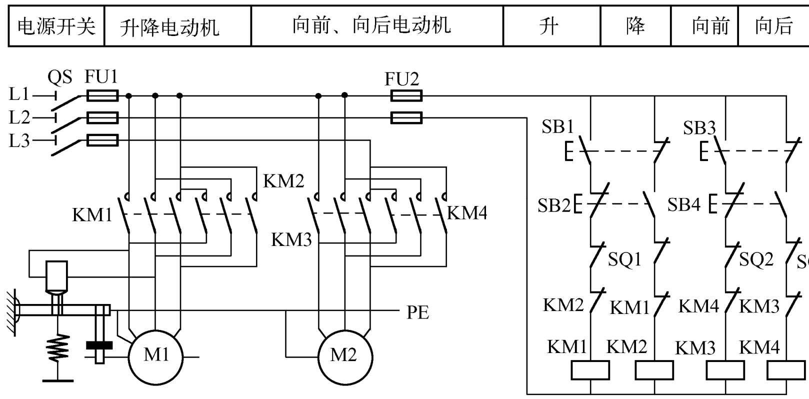


图 9-13　电动葫芦控制线路

1．主电路分析

主电路中有两台电动机，M1 为提升电动机，实现重物的提升；M2 为小车电动机，带动电动葫芦前后方向运行。提升机构用的电动机 M1 轴端配装电磁制动器，当电动机断电时，靠弹簧与抱闸实现断电制动。

2．控制电路分析

电动葫芦的上、下运动和前后运动，均采用双重互锁、点动控制的正、反转控制线路来实现。

按压上升按钮 SB1，接触器 KM1 线圈得电，接触器 KM1 的主触头合上，提升电动机 M1 及电磁铁制动器同时通电，提升电动机启动，重物被提升；放开按钮 SB1，接触器 KM1 的线圈断电，提升电动机 M1 与电磁铁制动器同时断电，电动机迅速停转，重物停留在空中。需要重物下降时，应按压下降按钮 SB2，此时接触器 KM2 线圈得电，提升电动机 M1 反转，重物下降。

电磁铁制动器的工作原理：当电磁铁线圈通电时，动铁芯被吸上运动，拉动弹簧，使紧抱电动机制动轮的抱闸瓦松开，提升电动机得以启动。当电磁铁线圈断电时，在弹簧拉力的作用下，使抱闸瓦紧抱电动机轴上的制动轮，电动机迅速停转。

当需要电动葫芦进行平移时，按压向前运动按钮 SB3 或向后运动按钮 SB4，接触器 KM4 或 KM3 线圈得电，小车电动机 M2 正转或反转，带动小车前后方向运行。

3．保护电路分析

提升电动机的上升和小车前后运动的终端设有极限保护行程开关。当提升吊钩上升到极限位置时，安装于钢丝绳上的撞块，顶着行程开关 SQ1，使 SQ1 的常闭触头断开，提升电动机断电停转，重物停止上升，实现了位置的极限保护。当小车前后运动至终端时，安装于轨道末端上的撞块使终端行程开关 SQ2 或 SQ3 动作，其常闭触头断开，接触器 KM3 或 KM4 线圈断电，小车电动机停转。

另外，在电动葫芦中，采用断电抱紧电磁铁制动器，避免工作中突然断电而使重物下滑造成事故。

9.5 现代控制技术的简介*

9.5.1 可编程序控制器及其应用基础

可编程序控制器（Programmable Controller）是计算机家族中的一员，是为工业控制应用而设计的。早期的可编程序控制器称为可编程序逻辑控制器（Programmable Logic Controller），简称 PLC，用它来代替继电器实现逻辑控制。随着技术的发展，可编程序控制器的功能已大大超过了逻辑控制的范围，所以，目前人们都把这种装置称为可编程序控制器，称为 PC（国标简称可编程序控制器为 PC 系统）。为了避免与目前应用广泛的个人计算机（Personal Computer）的简称 PC 相混淆，所以仍将可编程序控制器简称为 PLC。

1．可编程序控制器的分类

PLC 的种类很多，使其在实现的功能、内存容量、控制规模、外形等方面都存在较大的差异，因此，PLC 的分类没有一个严格、统一的标准，而是按 I/O 总点数、组成结构、功能进行大致的分类。

1）按 I/O 总点数分类

按 I/O 总点数分，PLC 通常分为小型、中型、大型三类。

（1）小型 PLC：I/O 总点数为 256 点及其以下的 PLC。

（2）中型 PLC：I/O 总点数超过 256 点且在 2048 点以下的 PLC。

（3）大型 PLC：I/O 总点数为 2048 点及其以上的 PLC。

还有，把 I/O 总点数少于 32 点的 PLC 称为微型或超小型 PLC，而把 I/O 总点数超过万点的 PLC 称为超大型 PLC。

2）按组成结构分类

按组成结构分，PLC 可分为整体式和模块式两类。

（1）整体式 PLC。

整体式 PLC 是将中央处理器、存储器、I/O 点、电源等硬件都装在一个箱状机壳内，结构非常紧凑。它的体积小，价格低，小型 PLC 一般采用整体式结构。如图 9-14 所示是三菱公司的 FX1s 系列整体式 PLC。

整体式 PLC 提供多种不同的 I/O 点数的基本单位和扩展单元供用户选用，基本单位内有 CPU 模块、I/O 模块和电源，扩展单位内只有 I/O 模块和电源，基本单元和扩展单元之间用扁平电缆连接。各单元的输入点与输出点的比例是固定的，有的 PLC 有全输入型和全输出型的扩展单元。选择不同的基本单元和扩展单元，可以满足用户的不同要求。

整体式 PLC 一般配备有许多专用的特殊功能单元，如模拟量 I/O 单元、位置控制单元和通信单元等，使 PLC 的功能得到扩展。

FX 系列的基本单元、扩展单元和扩展模块的高度深度相同，但宽度不同。它们不用基板，各模块可用底部自带的卡子卡在 DIN 导轨上，两个相邻的单元或模块之间用扁平电缆连接，安装好后组成一个整齐的长方体。

（2）模块式 PLC。

大、中型 PLC（如三菱的 A 系列和 Q 系列）一般采用模块式结构。模块式 PLC 用搭积木的方式组成系统，它由机架（有的厂家称机架为基板）和模块组成，如图 9-15 所示。



图 9-14　三菱公司的 FX1s 系列整体式 PLC



图 9-15　三菱 Q 系列模块式 PLC

模块式 PLC 是将 PLC 的各部分分成若干个单独的模块，如将 CPU、存储器组成主控模块；将电源组成电源模块；将若干输入点组成 I 模块，若干输出点组成 O 模块；将某项的功能，专门制成一定的功能模块等。模块式 PLC 由用户自行选择所需要的模块，安插在机架或基板上。

PLC 厂家备有不同槽数的机架供用户选用，如果一个机架容纳不下所选用的模块，可以增设一个或数个扩展机架，各机架之间用 I/O 扩展电缆相连，有的 PLC 需要通过接口模块来连接各机架。模块式 PLC 具有配置灵活、装配方便、便于扩展和维修等优点，较多用于中型或大型机。由于其输入、输出模块可根据实际需要任意选择，组合灵活，维修方便，致使目前也有一些小型机采用模块式。近期，也出现了把整体式、模块式两者的长处结合为一体的一种 PLC 结构，即所谓的叠装式 PLC。它的 CPU 和存储器、电源、I/O 等单元依然是各自独立的模块，但它们之间通过电缆进行连接，且可一层层地叠装，既保留了模块式可灵活配置之所长，也体现了整体式体积小之优点。

2．可编程序控制器的硬件结构

PLC 种类繁多，功能多种多样，但是其组成结构和工作原理基本相同。实质上是一种专门用于工业控制的计算机，采用了典型的计算机结构，由硬件和软件两部分组成。硬件配置主要由中央处理器（CPU）、存储器、输入/输出接口电路、电源、编程器及一些扩展模块组成，如图 9-16 所示。

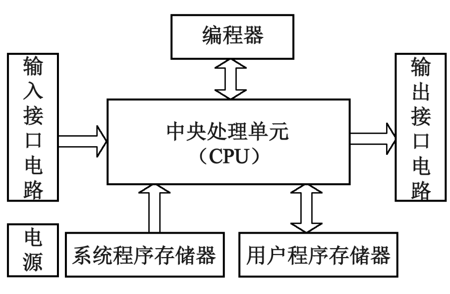


图 9-16　PLC 结构框图

1）中央处理器（CPU）

PLC 的中央处理器与一般的计算机控制系统一样，是整个系统的核心，起着类似人体的大脑和神经中枢的作用，它按 PLC 中系统程序赋予的功能，指挥 PLC 有条不紊地进行工作。其主要任务有如下几个方面。

（1）控制从编程器、上位机和其他外部设备输入的用户程序和数据的接收与存储。

（2）用扫描的方式通过电源 I/O 部件接收现场的状态或数据，并存入指定的存储单元或数据寄存器中。

（3）诊断电源、PLC 内部电路的工作故障和编程中的语法错误等。

（4）PLC 进入运行程序后，从存储器逐条读取用户指令，经过命令解释后，按指令规定的任务进行数据传送、逻辑或算数运算等。

（5）根据运算结果，更新有关标志位的状态和输出寄存器的内容，再经输出部件实现输出控制、制表、打印或数据通信等功能。

与通用微机不同的是，PLC 具有面向电气技术人员的开发语言。通常，用户使用虚拟的输入继电器、输出继电器、中间辅助继电器、时间继电器、计数器等，这些虚拟的继电器也称“软继电器”或“软元器件”，理论上具有无限的动合、动断触点，但只能在 PLC 上编程时使用，其具体结构对用户透明。

2）存储器

PLC 的存储器分为系统程序存储器和用户程序存储器。系统程序相当于个人电脑的操作系统，它使 PLC 具有基本的智能，能够完成 PLC 设计者规定的各种动作。系统程序由 PLC 生产厂家设定并固化在 ROM 内，用户不能直接读取。PLC 的用户程序由用户设定，它决定了 PLC 输入信号之间的具体关系。用户程序存储量一般以字（每个字由 16 位二进制数组成）为单位，三菱的 FX 系列 PLC 的用户程序存储器的单位为步（STEP，即字）。小型 PLC 的用户程序存储器容量在 1k 字左右，大型 PLC 的用户程序存储器容量可达数 M（兆）字。

PLC 常用以下几种存储器。

（1）随机存取存储器（RAM）。

用户可以用编程器读出 RAM 中的内容，也可以将用户程序写入 RAM，因此 RAM 又称为读/写存储器。它是易失性的存储器，将它的电源断开后，存储的信息将丢失。

RAM 的工作速度快，价格低，改写方便。为了在关断 PLC 外部电源后，保存 RAM 中的用户程序和数据（如计数器的计数值），为 RAM 配备了一个后备电池。现在有的 PLC 用 RAM 来存储程序。

锂电池可用 2～5 年，需要更换锂电池时，PLC 面板上的“电池电压过低”发光二极管会亮，同时有一个内部标志变为 1 状态，可以用它的常开触点来接通控制面板上的指示灯或声光报警器，通知用户更换电池。

（2）只读存储器（ROM）。

ROM 的内容只能读出，不能写入，它是非易失的，它的电源消失后，仍能保存存储的内容。ROM 一般用来存放 PLC 的系统程序。

（3）可电擦除 EPROM（EEPROM 或 E^2PROM）。

它是非易失性的，但是可以用编程器对它编程。它兼有 ROM 的非易失性和 RAM 的随机性存取优点，但是写入信息所需时间比 RAM 长得多。EEPROM 用来存放用户程序。有的 PLC

将 EEPROM 作为基本配置，有的 PLC 将 EEPROM 作为可选件。

3）输入/输出接口电路

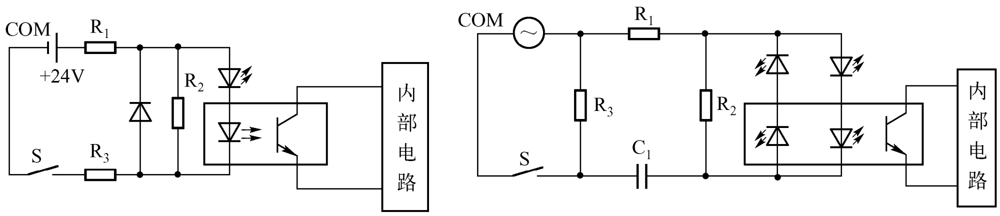
实际生产中信号电平是多样的，外部执行机构所需要的电平也是不同的，而可编程序控制器的 CPU 所处理的信号只能是标准电平，因此，需要通过输入/输出单元实现这些信号电平的转换。可编程序控制器的输入/输出单元实际上是 PLC 与被控制对象之间传送信号的接口部件。

输入/输出单元具有良好的电隔离和滤波作用。连接到 PLC 输入端的输入器件是各种开关、操作开关和传感器等。通过接口电路将这些开关信号转换成为 CPU 能够识别和处理的信号，并送入输入映像寄存器。运行时 CPU 从输入映像寄存器中读取输入信息并进行处理，将处理结果存放到输出映像寄存器。输入/输出映像寄存器由相应的输入/输出触发器组成，输出接口将其弱电控制转换为现场所需要的强电信号输出，驱动显示灯、电磁阀、继电器、接触器等各种被控设备的执行器件。

（1）输入接口电路。

为了防止各种干扰信号和高电压信号进入 PLC，输入接口电路一般由 RC 滤波器消除输入端的抖动和外部噪声干扰，由光电耦合电路进行隔离。光电耦合电路由发光二极管和光电三极管组成。

各种 PLC 输入电路的结构大都相同，其输入方式有两种类型：一种是直流输入（直流 12V 或 24V），如图 9-17（a）所示；另一种是交流输入（交流 100～120V 或 200～240V），如图 9-17（b）所示。它们都是由装在 PLC 面板上的发光二极管来显示某一输入点是否有信号输入。



（a）直流输入电路　　（b）交流输入电路

图 9-17　输入接口电路

外部器件可以是无源触点，如按钮、行程开关等，也可以是有源器件，如传感器、接近开关、光电开关等。在 PLC 内部电源容量允许的情况下，有源器件可以采用 PLC 内部电源，否则必须外设电源。当输入信号为模拟量时，信号必须经过专用的模拟量输入模块进行 A/D 转换后才能送入 PLC 内部。输入信号通过输入端子经 RC 滤波、光电隔离进入内部电路。

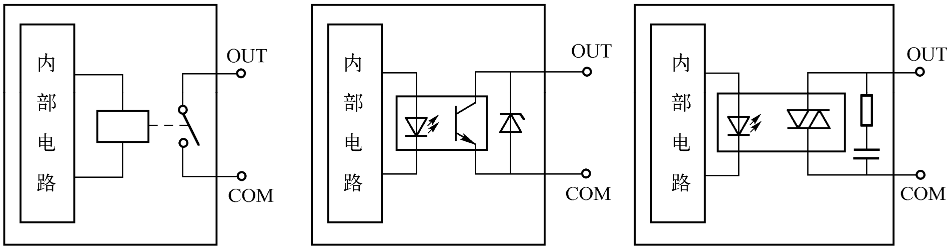
（2）输出接口电路。

PLC 的输出有三种形式：继电器输出、晶体管输出、晶闸管输出。图 9-18 给出了 PLC 的三种输出电路图。每种输出都采用了电气隔离技术，电源由外部供给，输出电流一般为 0.5～2A，输出电流的额定值与负载性质有关。

继电器输出方式最常用，适用于交、直流负载，其特点是带负载能力强，但动作频率与响应速度慢。

晶体管输出适用于直流负载，其特点是动作频率高、响应速度快，但带负载能力小。

晶闸管输出适用于交流负载，响应速度快，带负载能力不大。



（a）继电器输出　　（b）晶体管输出　　（c）晶闸管输出

图 9-18　输出接口电路

输出接口电路规格如表 9-3 所示。

表 9-3　输出接口电路规格

项　目		继电器输出	晶体管输出	晶闸管输出
负载电源		AC 250V 以下，DC 30V 以下	DC 5～30V	AC 85～242V
电路绝缘		机械绝缘	光电耦合绝缘	光电耦合绝缘
负载电流		2A/1 点 8A/4 点公用	0.5A/1 点 0.8A/4 点	0.3A/1 点 0.8A/4 点
响应时间	断通	约 10ms	0.2ms 以下	1ms 以下
	通→断	约 10ms	0.2ms 以下	10ms 以下

4）电源

PLC 的电源分为外部电源、内部电源和后备电源三类。在现场控制中，干扰侵入 PLC 的主要途径之一是通过电源，因此，合理地设计电源是 PLC 可靠运行的必要条件。

内部电源是 PLC 的工作电源，有时也作为现场输入信号的电源。它的性能好坏直接影响到 PLC 的可靠性，为了保证 PLC 可靠工作，对它提出了较高的要求，一般可从 4 个方面考虑：

（1）内部电源与外部电源隔离，减小供电线路对内部电源的影响。

（2）有较强的抗干扰能力（主要是高频干扰）。

（3）电源本身功能耗尽可能低，在供电电压波动范围较大时，能保证正常稳定的输出。

（4）有良好的保护功能。

5）编程器

编程器是 PLC 最重要的外部设备。利用编程器可将用户程序输入到 PLC 存储器，可以利用编程器检查、修改、调试程序，还可以用编程器监视程序的运行及 PLC 的工作状态。小型 PLC 常用的简易型便携式或手持式编程器。计算机添加适当的硬件接口电缆和编程软件，也可以对 PLC 进行编程。计算机编程可以直接显示梯形图、读出程序、写入程序、监控程序运行等。

3．可编程序控制器的软件系统

PLC 是一种工业控制计算机，不只有硬件，软件也是必不可少。PLC 的软件又分为系统软件和用户软件。

系统软件包括系统的管理程序，用户指令的解释程序，另外还包括一些供系统调用的专用标准程序块等。系统软件在 PLC 生产时由制造商装入机内，永久保存，用户不需要更改。

用户软件是用户为达到某种控制目的，采用 PLC 厂商提供的编程语言自主编制的应用

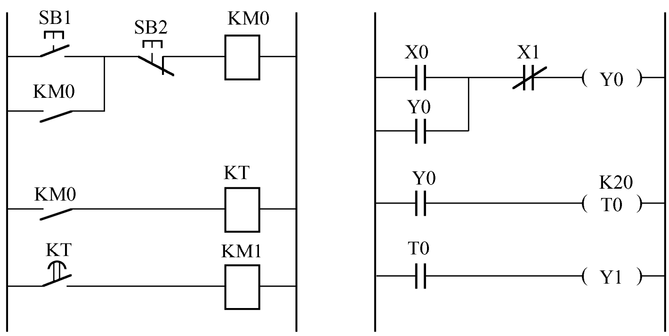
程序。

用户程序的编制需要使用 PLC 生产制造厂商提供的编程语言。PLC 使用的编程语言共有五种，即梯形图、指令语句表、步进顺控图、逻辑符号图、高级编程语言。

1）梯形图

梯形图是最直观、最简单的一种编程语言，它类似继电接触器控制电路的形式，逻辑关系明显，在继电接触器控制逻辑基础上使用简化的符号演变而来，具有形象、直观、实用等优点，电气技术人员容易接受，是目前使用较多的一种 PLC 编程语言。

继电接触器控制线路图和 PLC 梯形图如图 9-19 所示。



（a）控制线路　　（b）梯形图

图 9-19　继电接触器控制线路和 PLC 梯形图

由图可见，两种控制图逻辑含义是一样的，但具体表示方法有本质区别。梯形图中的继电器、定时器、计数器不是实物的继电器、定时器、计数器，这些元件实际是 PLC 存储器中的存储位，因此称为软元件，相应的位为“ 1 ”状态，表示该继电器线圈通电、常开触点闭合、常闭触点断开。

梯形图左右两端的母线是不接任何电源的。梯形图中并不流过真实的电流，而是概念电流（假想电流）。假想电流只能从左到右，从上到下流动。假想电流是执行用户程序时满足输出条件而进行的假设。

梯形图由多个梯级组成，每个梯级由一个或多个支路和输出元件构成。同一个梯形图中的编程元件，不同的厂家会有所不同，但它们表示的逻辑控制功能是一致的。

利用梯形图或基本指令编程，要符合一些编程的规则。

（1）从左至右。梯形图的各类继电器触点要以左母线为起点，各类继电器线圈以右母线为终点（可允许省略右母线）。从左至右分行画出，每一逻辑行构成一个梯级，每行开始的触点组构成输入组合逻辑（逻辑控制条件），最右边的线圈表示输出函数（逻辑控制的结果）。

（2）从上到下。各梯级从上到下依次排列。

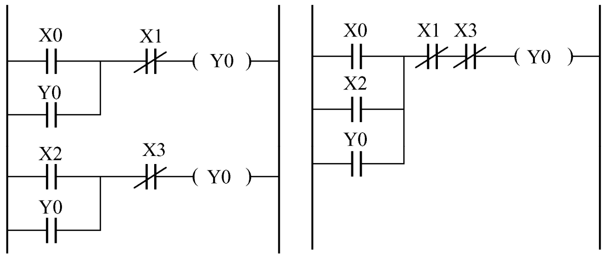
（3）水平放置编程元件。触点画在水平线上（主控触点除外），不能画在垂直线上。

（4）线圈右边无触点。线圈不能直接接左母线，线圈右边不能有触点，否则将发生逻辑错误。

（5）双线圈输出应慎用。如果在同一个程序中，同一个元件的线圈被使用两次或多次，则称为双线圈输出。这时前面的输出无效，只有最后一次有效。双线圈输出在程序方面并不违反输入，但输出动作复杂，因此应谨慎使用。如图 9-20（a）所示的双线圈输出，可以通过变换梯形图避免双线圈输出，如图 9-20（b）所示。

（6）触点使用次数不限。触点可以串联，也可以并联。所有输出继电器都可以作为辅助继电器使用。

（7）合理布置。串联多的电路放在上部，并联多的电路移近左母线，可以简化程序，节省存储空间，如图 9-21 所示。



（a）双线圈输出梯形图　（b）避免双线圈输出梯形图

图 9-20　双线圈输出

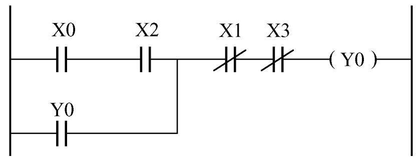
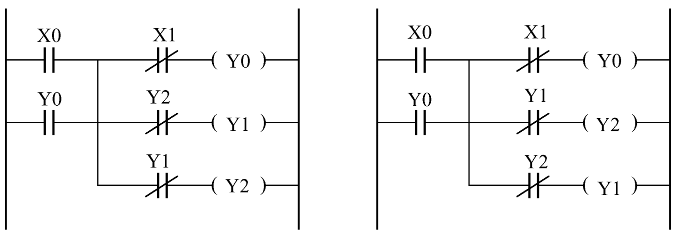


图 9-21　合理布局

（8）PLC 是串行运行的，PLC 程序的顺序不同，其执行结果会有差异，如图 9-22 所示。程序从第一行开始，按从左到右、从上到下顺序执行。在图 9-22（a）中，X0 为 ON，Y0、Y1 为 ON，Y2 为 OFF；在图 9-22（b）中，X0 为 ON，Y0、Y2 为 ON，Y1 为 OFF。而继电接触控制是并行的，待电源接通，各并联支路同时具有电压，同时动作。



（a）　（b）

图 9-22　串行运行差异

2）指令语句表

指令语句表是一种与计算机汇编语言相类似的助记符编程语言，简称语句表，它用一系列操作指令组成的语句描述控制过程，并通过编程器传输到 PLC 中。不同厂家的指令语句表使用的助记符可能不同，因此一个功能相同的梯形图，书写的指令语句表可能并不相同。表 9-4 是用三菱 FX 系列 PLC 指令语句表完成的图 9-22（b）控制功能编写的程序。

表 9-4　FX 系列 PLC 指令语句表

步序	指令操作码（助记符）	操作数（参数）	步序	指令操作码（助记符）	操作数（参数）
0	LD	X0	6	OUT	T0
1	OR	Y0			K20
2	ANI	X1	9	LD	T0
3	OUT	Y0	10	OUT	Y1
5	LD	Y0			

指令语句表编程语言是由若干条语句组成的程序，语句是程序的最小独立单元。每个操作功能由一条语句来表示。PLC 的语句由指令操作码和操作数两部分组成。操作码由助记符表示，

用来说明操作的功能，告诉 CPU 做什么，比如：逻辑运算的与、或、非等和算术运算的加、减、乘、除等。操作数一般由标志符和参数组成，标志符表示操作数类别，如输入继电器、定时器、计数器等，参数表示操作数的地址或预定值。

3）步进顺控图

步进顺控图，简称步进图，又叫状态流程图或状态转移图，是使用状态来描述空盒子任务或过程的流程图，是一种专门用于工业顺序控制的程序设计语言。它能完整地描述控制系统的工作过程、功能和特性，是分析、设计电气控制系统控制程序的重要工具。步进顺控图如图 9-23 所示。

4）逻辑符号图

逻辑符号图与数字电路的逻辑图极为相似，模块有输入端、输出端，使用与、或、非、异或等逻辑描述输出端和输入端的函数关系，模块间的连接方式与电路连接方式基本相同。逻辑符号图编程语言直观易懂，容易掌握。三菱 FX2N 没有此功能。逻辑符号图如图 9-24 所示。

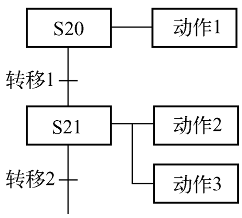


图 9-23　步进顺控图

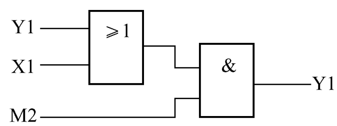


图 9-24　逻辑符号图

5）高级编程语言

在大型 PLC 中，为了完成具有数据处理、PID 调节、定位控制、图形操作等较为复杂的控制，往往使用高级计算机编程语言，如 C 语言、BASIC 语言等，使 PLC 具有更强的功能。

4．可编程序控制器的工作原理

PLC 是一种工业控制计算机，所以它的工作原理与计算机的工作原理基本上是一致的。PLC 的工作方式采用周期循环扫描。PLC 投入运行后，都是以重复的方式执行的，执行用户程序不是只执行一遍，而是一遍一遍不停地循环执行，这里每执行一遍我们称为扫描一次，扫描一遍用户程序的时间称为扫描周期。扫描一次，PLC 内部要进行一系列操作，大致分为五个阶段：故障诊断、通信处理、输入采样、程序执行、输出刷新。下面重点说明输入采样、程序执行、输出刷新三步操作，图 9-25 为这三步的流程图。

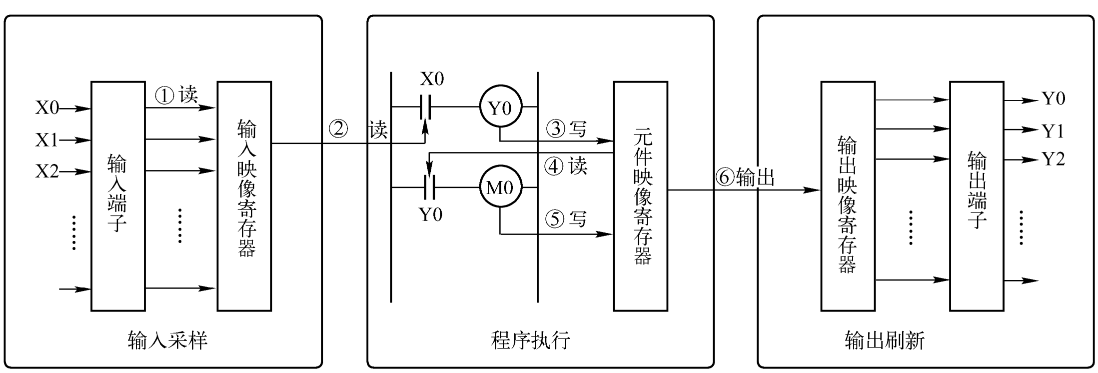


图 9-25　PLC 的扫描过程

1）输入采样阶段

当 PLC 投入运行时，PLC 以扫描方式依次读入所有输入端子口的状态和数据，并把这些数据存入（I）映像区的相应单元内。输入采样结束后，转入用户程序执行和输出刷新阶段。在这两个阶段中，即使输入状态和数据发生变化，（I）映像区中相应单元的状态和数据也不会改变。因此，如果输入脉冲信号，则该脉冲信号的宽度必须大于一个扫描周期，才能保证该输入信号不被丢失。

2）程序执行阶段

PLC 在用户程序执行阶段，CPU 总是按由上而下的顺序依次扫描用户的梯形图程序。扫描每一条梯形图支路时，又是由左到右。先上后下的顺序对由触点和线圈构成的控制线路进行逻辑运算，并根据逻辑运算的结果，刷新该逻辑线圈在系统 RAM 存储器中对应位的状态；或者确定是否要执行该梯形图所规定的特殊功能指令。

要指出的是，在执行用户程序阶段，只有输入点在 I/O 映像区内的状态和数据不会发生变化，而其他输出点和软元件在 I/O 映像区或系统 ROM 存储区的状态和数据都可能发生变化。排在上面的梯形图，其被刷新的逻辑线圈或输出线圈的状态或数据对排在下面的凡是用到这些线圈的触点或数据的梯形图起作用；相反，排在下面的梯形图，其被刷新的逻辑线圈或输出线圈的状态或数据只能到下一个扫描周期才能对排在其上面用到这些线圈的触点或数据的梯形图起作用。

3）输出刷新阶段

PLC 的 CPU 扫描用户程序结束后，PLC 就进入输出刷新阶段。在此期间，CPU 按照 I/O 映像区内对应的状态和数据刷新所有的输出锁存电路，再经输出电路驱动相应的被控负载，这才是 PLC 的真正输出。

用户程序执行扫描方式既可按上述固定顺序方式，也可以按程序指定的可变顺序进行。

循环扫描的工作方式是 PLC 的一大特点，针对工业控制采用这种工作方式使 PLC 具有一些优于其他各种控制器的特点。例如，可靠性、抗干扰能力明显提高；串行工作方式避免触点（逻辑）竞争；简化程序设计；通过扫描时间定时监视，可诊断 CPU 内部故障，避免程序异常运行的不良影响等。

循环扫描工作方式的主要缺点是带来了 I/O 响应滞后性。影响 I/O 响应滞后的主要因素有：输入电路和输出电路的响应时间、PLC 中 CPU 的运算速度、程序设计结构等。

一般工业设备是允许 I/O 响应滞后的，但对某些需要 I/O 快速响应的设备，则应采取相应措施，尽可能提高响应速度，如硬件设计上采用快速响应模块、高速计数模块等，在软件设计上采用不同中断处理措施、优化设计程序等。这些都是减少响应时间的重要措施。

5．可编程序控制器编程的基本指令

1）LD 取指令

它是常开触点与左母线连接指令，也可在分支开始处使用，与后述的块操作指令 ANB 或 ORB 配合使用。其操作的目标元件（操作数）为 X、Y、M、T、C、S。

2）OUT 输出指令

OUT 输出指令是线圈驱动指令，用逻辑运算的结果去驱动一个指定的线圈，线圈必须与右母线相连（程序中右母线可以省略不画）。本指令可驱动输出继电器、辅助继电器、定时器、计数器、状态继电器和功能指令，但不能驱动输入继电器；其目标元件为 Y、M、T、C、S 和功能指令线圈 F；可并行输出，在梯形图中相当于线圈并联；注意输出线圈不能串联使用。对

定时器、计数器的输出，除使用 OUT 指令外，还必须设置时间常数 K，或指定数据寄存器的地址，时间常数 K 要占用一步。

3）END 结束指令

程序结束并返回程序开始处。

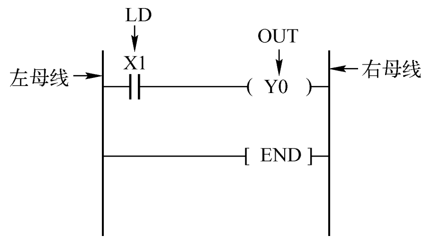


图 9-26　程序举例

【例 9-1】将如图 9-26 所示的点动控制梯形图用指令形式列出，并输入 PLC 进行运行。

解：按照梯形图转换成指令程序的方法，按自上而下、自左至右的顺序依次进行转换，指令程序为

0 LD X1

1 OUT Y0

2 END

例题说明：

当按下按钮时，X1 接通，线圈 Y0 得电吸合，电动机转动。当松开按钮时，按钮 X1 断开，线圈 Y0 断电复位，电动机停转。程序的执行过程是：程序从第 0 步指令开始执行，扫描 PLC 的输入点的状态并存储到 PLC 的输入映像寄存器中，然后进行逻辑运算（执行程序），将运算的结果存到输出映像寄存器中，最后统一输出，到最后一步指令 END 结束后，又返回到第 0 步程序处。执行过程可参考控制示意图如图 9-27 所示，时序图如图 9-28 所示。

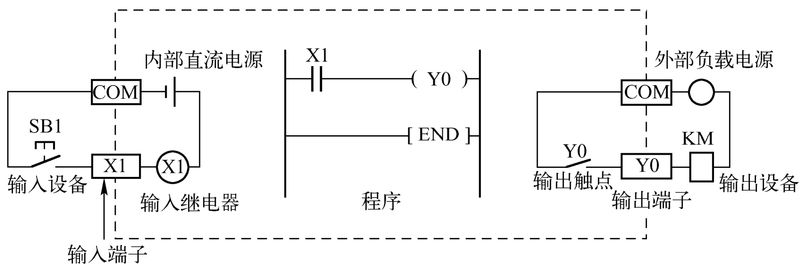


图 9-27　程序执行原理

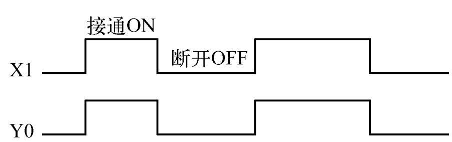


图 9-28　时序图

4）LDI 取反指令

常闭触点与母线连接指令，也可在分支开始处使用，与后述的块操作指令 ANB 或 ORB 配合使用。其操作的目标元件为 X、Y、M、T、C、S。指令用法参考程序如图 9-29 所示，时序图如图 9-30 所示。

5）AND 与指令

AND 与指令使继电器的常开触点与其他继电器的触点串联。串连接点的数量不限，重复使用指令的次数不限；操作的目标元件为 X、Y、M、T、C、S。

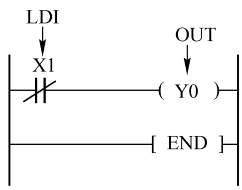


图 9-29　程序举例

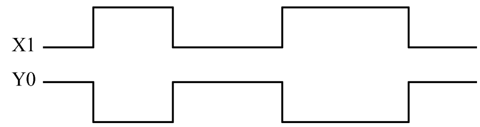


图 9-30　时序图

6）ANI 与非指令

ANI 与非指令使继电器的常闭触点与其他继电器的触点串联。它的使用与 AND 指令相同。

AND 和 ANI 指令的用法如图 9-31 所示。

7）OR 或指令

OR 或指令并联单个常开触点，将 OR 指令后的操作元件从此位置一直并联到离此条指令最近的 LD 或 LDI 指令上，并联的数量不受限制。若要将两个以上的接点串联而成的电路块并联，要用到后述的 ORB 指令。

8）ORI 或非指令

ORI 或非指令并联单个常闭触点，它的使用与 OR 指令相同。

OR 和 ORI 指令的用法如图 9-32 所示。

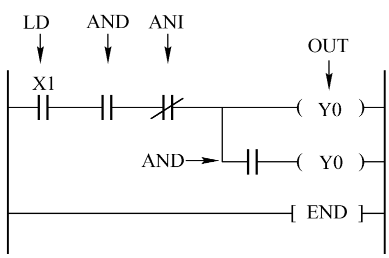


图 9-31　程序举例

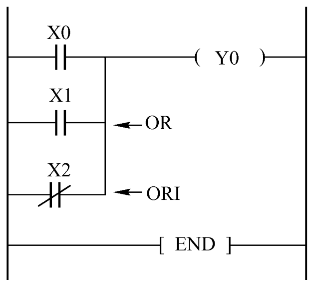


图 9-32　程序举例

6．编程举例

1）控制要求

按下按钮 SB1 后，小灯 L1 亮，松开按钮，小灯灭。按下按钮 SB2 后，小灯 L2 长亮，按下按钮 SB3 后，小灯 L2 灭。

2）方法与步骤

列出 I/O 分配表和 I/O 外部接线图，如图 9-33 所示。

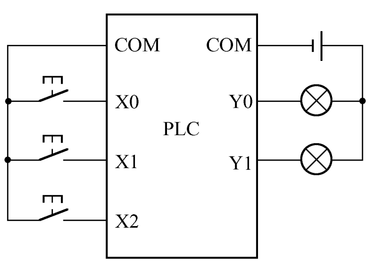


图 9-33　I/O 接线图

（1）I/O 分配表。

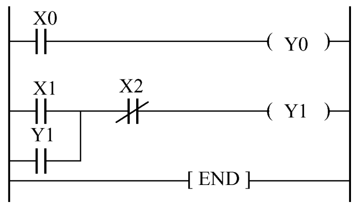
输入信号：SB1　X0

SB2　X1

SB3　X2

输出信号：L1　Y0

L2　Y1



LD	X0
OUT	Y0
LD	X1
OR	Y1
ANI	X2
OUT	Y1
END	

图 9-34　程序举例

（2）I/O 外部接线图。

分析并编制程序：

① 使 Y0 输出的信号：X0；

② 使 Y1 输出的信号：X1；

③ 使 Y1 停止输出的信号：X2。

据此编制程序，如图 9-34 所示。

9.5.2 变频器及其应用基础

1．变频器的基本结构

变频器是把工频电源（50Hz 或 60Hz）变换成各种频率的交流电源以实现电动机的变速运行的设备。其中控制电路完成对主电路的控制，整流电路将交流电变换成直流电，直流中间电路对整流电路的输出进行平滑滤波，逆变电路将直流电再逆变成交流电。对于如矢量控制变频器这种需要大量运算的变频器来说，有时还需要一个进行转矩计算的 CPU，以及一些相应的电路。

2．变频器的分类

变频器的分类方法有多种，按照主电路工作方式分类，可以分为电压型变频器和电流型变频器；按照开关方式分类，可以分为 PAM 控制变频器、PWM 控制变频器和高载频 PWM 控制变频器；按照工作原理分类，可以分为 V/f 控制变频器、转差频率控制变频器和矢量控制变频器等；按照用途分类，可以分为通用变频器、高性能专用变频器、高频变频器、单相变频器和三相变频器等。

3．变频器中常用的控制方式

1）非智能控制方式

在交流变频器中使用的非智能控制方式有 V/f 协调控制、转差频率控制、矢量控制、直接转矩控制等。

（1）V/f 控制。

V/f 控制是为了得到理想的转矩-速度特性，基于在改变电源频率进行调速的同时，又要保证电动机的磁通不变的思想而提出的，通用型变频器基本上都采用这种控制方式。V/f 控制变频器结构非常简单，但是这种变频器采用开环控制方式，不能达到较高的控制性能，而且，在

低频时，必须进行转矩补偿，以改变低频转矩特性。

（2）转差频率控制。

转差频率控制是一种直接控制转矩的控制方式，它是在 V/f 控制的基础上，按照异步电动机的实际转速对应的电源频率，并根据希望得到的转矩来调节变频器的输出频率，就可以使电动机具有对应的输出转矩。这种控制方式，在控制系统中需要安装速度传感器，有时还加有电流反馈，对频率和电流进行控制，因此，这是一种闭环控制方式，可以使变频器具有良好的稳定性，并对急速的加减速和负载变动有良好的响应特性。

（3）矢量控制。

矢量控制是通过矢量坐标电路控制电动机定子电流的大小和相位，以达到对电动机在 d、q、o 坐标轴系中的励磁电流和转矩电流分别进行控制，进而达到控制电动机转矩的目的。通过控制各矢量的作用顺序和时间以及零矢量的作用时间，又可以形成各种 PWM 波，达到各种不同的控制目的。例如，形成开关次数最少的 PWM 波，以减少开关损耗。目前在变频器中实际应用的矢量控制方式主要有基于转差频率控制的矢量控制方式和无速度传感器的矢量控制方式两种。

基于转差频率的矢量控制方式与转差频率控制方式两者的定常特性一致，但是基于转差频率的矢量控制还要经过坐标变换对电动机定子电流的相位进行控制，使之满足一定的条件，以消除转矩电流过渡过程中的波动。因此，基于转差频率的矢量控制方式比转差频率控制方式在输出特性方面能得到很大的改善。但是，这种控制方式属于闭环控制方式，需要在电动机上安装速度传感器，因此，应用范围受到限制。

无速度传感器矢量控制是通过坐标变换处理分别对励磁电流和转矩电流进行控制，然后通过控制电动机定子绕组上的电压、电流辨识转速以达到控制励磁电流和转矩电流的目的。这种控制方式调速范围宽，启动转矩大，工作可靠，操作方便，但计算比较复杂，一般需要专门的处理器来进行计算，因此，实时性不是太理想，控制精度受到计算精度的影响。

（4）直接转矩控制。

直接转矩控制是利用空间矢量坐标的概念，在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型，控制电动机的磁链和转矩，通过检测定子电阻来达到观测定子磁链的目的，因此省去了矢量控制等复杂的变换计算，系统直观、简洁，计算速度和精度都比矢量控制方式有所提高。即使在开环的状态下，也能输出 100%的额定转矩，对于多拖动具有负荷平衡功能。

（5）最优控制。

最优控制在实际中的应用根据要求的不同而有所不同，可以根据最优控制的理论对某一个控制要求进行个别参数的最优化。例如，在高压变频器的控制应用中，就成功地采用了时间分段控制和相位平移控制两种策略，以实现一定条件下的电压最优波形。

（6）其他非智能控制方式。

在实际应用中，还有一些非智能控制方式在变频器的控制中得以实现，例如，自适应控制、滑模变结构控制、差频控制、环流控制、频率控制等。

2）智能控制方式

智能控制方式主要有神经网络控制、模糊控制、专家系统、学习控制等。在变频器的控制中采用智能控制方式在具体应用中有一些成功的范例。

（1）神经网络控制。

神经网络控制方式应用在变频器的控制中，一般是进行比较复杂的系统控制，这时对于系

统的模型了解甚少，因此神经网络既要完成系统辨识的功能，又要进行控制。而且神经网络控制方式可以同时控制多个变频器，因此在多个变频器级联时进行控制比较适合。但是神经网络的层数太多或者算法过于复杂都会在具体应用中带来不少的困难。

（2）模糊控制。

模糊控制算法用于控制变频器的电压和频率，使电动机的升速时间得到控制，以避免升速过快对电动机使用寿命的影响，以及升速过慢影响工作效率。模糊控制的关键在于论域、隶属度，以及模糊级别的划分，这种控制方式尤其适用于多输入、单输出的控制系统。

（3）专家系统。

专家系统是利用所谓“专家”的经验进行控制的一种控制方式，因此，在专家系统中一般要建立一个专家库，存放一定的专家信息，另外还要有推理机制，以便于根据已知信息寻求理想的控制结果。专家库与推理机制的设计尤为重要，关系着专家系统控制的优劣。应用专家系统既可以控制变频器的电压，又可以控制其电流。

（4）学习控制。

学习控制主要是用于重复性的输入，而规则的 PWM 信号（如中心调制 PWM）恰好满足这个条件，因此学习控制也可用于变频器的控制中。学习控制不需要了解太多的系统信息，但是需要 1～2 个学习周期，因此快速性相对较差，而且，学习控制的算法中有时需要实现超前环节，这用模拟器件是无法实现的，同时，学习控制还涉及一个稳定性的问题，在应用时要特别注意。

4．变频器控制的展望

随着电力电子技术、微电子技术、计算机网络等高新技术的发展，变频器的控制方式今后将向以下几个方面发展。

1）数字控制变频器的实现

现在，变频器的控制方式用数字处理器可以实现比较复杂的运算，变频器数字化将是一个重要的发展方向，目前进行变频器数字化主要采用单片机 MCS51 或 80C196MC 等，辅助以 SLE4520 或 EPLD 液晶显示器等来实现更加完善的控制性能。

2）多种控制方式的结合

单一的控制方式有着各自的优缺点，并没有“万能”的控制方式，在有些控制场合，需要将一些控制方式结合起来，例如，将学习控制与神经网络控制相结合，自适应控制与模糊控制相结合，直接转矩控制与神经网络控制相结合，或者称之为“混合控制”，这样取长补短，控制效果将会更好。

3）远程控制的实现

计算机网络的发展，使“天涯若咫尺”，依靠计算机网络对变频器进行远程控制也是一个发展方向。通过 RS485 接口及一些网络协议对变频器进行远程控制，这样在有些不适合人类进行现场操作的场合，也可以很容易地实现控制目标。

4）绿色变频器

随着可持续发展战略的提出，对于环境的保护越来越受到人们的重视。变频器产生的高次谐波对电网会带来污染，降低变频器工作时的噪声，以及增强其工作的可靠性、安全性等这些问题，都试图通过采取合适的控制方式来解决，设计出绿色变频器。

5．结束语

变频器的控制方式是一个值得研究的问题，依靠致力于这项工作的有识之士的共同努力，使国产变频器早日走向世界市场并且成为一流的产品。

9.5.3 传感器及其应用基础

传感器（Transducer 或 Sensor）是将各种非电量（包括物理量、化学量、生物量等）按照一定的规律转换成便于处理和传输的另一种物理量（一般为电量）的装置。

随着社会的进步，科学技术的发展，特别是近 20 年来，电子技术日新月异，计算机的普及和应用把人类带到了信息时代，各种电气设备充满了人们生产和生活的各个领域，相当大一部分的电气设备都应用到了传感器，传感器技术是现代信息技术中主要技术之一，在国民经济建设中占据极其重要的地位。

1．传感器及传感技术

传感器技术是利用各种功能材料实现信息检测的一门应用技术，它是检测（传感）原理、材料科学、工艺加工等三个要素的最佳结合。检测（传感）原理是指传感器工作时所依据的物理效应、化学反应和生物反应等机理，各种功能材料则是传感技术发展的物质基础，从某种意义上讲，传感器也就是能感知外界各种被测信号的功能材料。传感技术的研究和开发，不仅要求原理正确，选材合适，而且要求有先进、高精度的加工装配技术。除此以外，传感技术还包括如何更好地把传感元件应用到各个领域的所谓传感器软件技术，如传感器的选择、标定及接口技术等。

1）传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件和测量电路三部分组成，有时还需要加辅助电源，如图 9-35 所示。

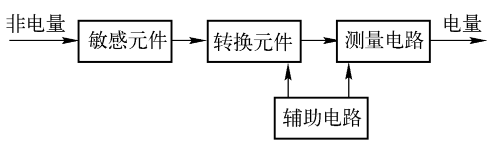


图 9-35　传感器的组成方块图

敏感元件（预变换器）：将不能够直接变换为电量的非电量转换为电量的非电量元件。

转换元件：将感受到的非电量直接转换为电量的器件称为转换元件，如压电晶体、热电偶等。

测量电路：将转换元件输出的电量变成便于显示、记录、控制和处理的有用电信号的电路称为测量电路。

2）传感器的分类

传感器的种类很多，目前尚没有统一的分类方法，一般常采用的分类方法有以下几种。

（1）按被测量分类。

传感器根据被测量分为加速度传感器、速度传感器、位移传感器、压力传感器、负荷传感器、扭矩传感器、温度传感器等。

（2）依据传感器的工作原理分类。

这种分类方法以传感器的工作原理为依据，分为电阻应变式、压电式、电容式、涡流式、动圈式、电磁式、差动变压器式等。

（3）按照能量的传递方式分类。

从能量观点看，所有的传感器可分为有源传感器与无源传感器两大类。

（4）根据输出信号的性质分类。

根据传感器输出信号性质传感器分为模拟传感器与数字传感器两大类。

2. 常用传感器原理及应用

1）应变式传感器

目前，自动测力或称重中应用最普遍的是应变式传感器。应变式传感器有下列优点。

（1）精确度高，线性好，灵敏度高。

（2）滞后和蠕变都较小，疲劳寿命高。

（3）容易二次仪表匹配，实现自动检测。

（4）结构较简单，体积较小，应用灵活。

（5）工作稳定可靠，维护和保养方便。

应变式传感器除可用于测量力参数外，还可用于测量差压、加速度、振幅等其他物理量。

导体或半导体在受到外力作用变形时，其电阻值也将随之变化，这种现象称为“应变效应”。金属导体或半导体的电阻之所以会随着其变形而发生变化，是因为导体或半导体的电阻是与材料的电阻率以及它的几何尺寸（长度和截面积）有关的，在导体或半导体承受机械变形过程中，这三者都要发生变化，因此引起导体或半导体的电阻发生变化。

取一根长度为 l、截面积为 S、电阻率为 ρ 的导体或半导体，其电阻为 R，则有

$$R=\rho\frac{l}{S}$$

式中　R——电阻值（Ω）；

ρ——电阻率（$\Omega\cdot mm^2\cdot m^{-1}$）；

l——电阻丝长度（m）；

S——电阻丝截面积（mm^2）。

根据大量实验证明，在材料的比例极限内，电阻的相对变化是成正比的。

2）电感式传感器

电感式传感器是基于电磁感应原理工作的。它将被测位移变化转换为自感系数 L 或互感系数 M 的变化，再经测量电路将 L 或 M 的变化转换为电压或电流变化，作为传感器的输出信号。电感式传感器有以下主要优点。

（1）结构简单、可靠，测量力小（电磁吸引力的数量级为 10^{-3}N）。

（2）灵敏度高，最高分辨力达 0.1μm。

（3）测量精确度高，输出线性度可达±0.1%。

（4）输出功率较大，在某些情况下可不经过放大直接接二次仪表。

其缺点是：传感器本身的频率响应不高，不适应快速动态测量；对激磁电源的频率和幅度的稳定要求较高；传感器分辨力与测量范围有关，测量范围大，分辨力低，反之则高。

自感式电感传感器的结构示意图如图 9-36 所示，它主要由线圈、铁芯和衔铁三部分组成。

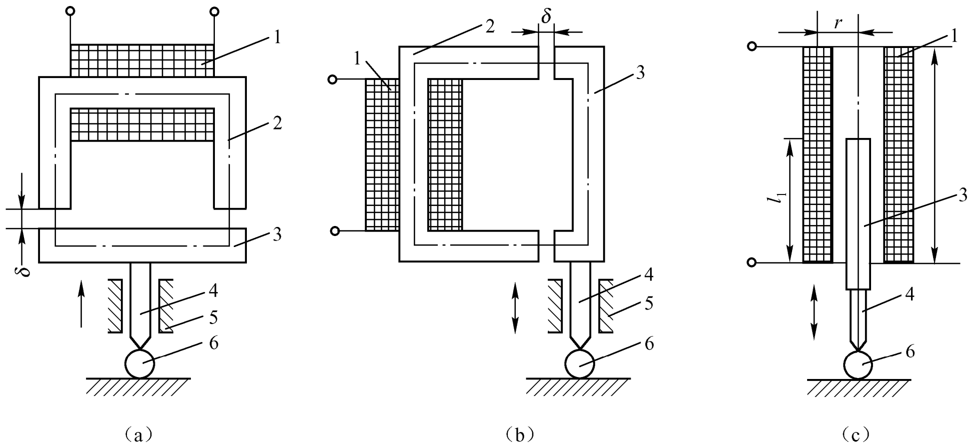


图 9-36　变气隙式电感传感器结构

1—线圈；2—固定铁芯；3—可动铁芯；4—连接棒；5—传感器外壳；6—测量探头

变气隙式电感传感器结构原理如图 9-36（a）所示。根据电磁学知识，线圈电感为

$$L=\frac{N}{R_m}$$

由于变气隙式电感传感器的气隙 δ 通常较小，可以认为气隙间磁场是均匀的，磁路是封闭的，因此可忽略磁路损失。则总磁阻可表示为

$$R_m=\frac{l}{\mu S}+\frac{2\delta}{\mu_0 S}$$

式中　l——导磁体的长度（cm）；

μ——导磁体的导磁率（H/cm）；

S——导磁体的横截面积（cm^2）；

δ——气隙的长度（cm）；

μ_0——空气的导磁率（$\mu_0=4\pi\times10^{-9}$H/cm）。

通常导磁体的磁阻与气隙的磁阻相比很小，计算时可以忽略，则线圈的电感值可简化为

$$L=\frac{N^2\mu_0 S}{2\delta}$$

电感线圈结构确定后，电感与面积成正比，与气隙长度成反比。这样，只要被测量能引起面积和气隙的变化，都可用电感传感器进行测量。

3）电容式传感器

电容式传感器的工作原理可以用平板电容器来说明。平板电容器是由两个金属极板、中间夹一层电介质构成的。如图 9-37 所示，乃是最简单的平板电容器原理图。

当忽略边缘效应时，其电容器的电容量为

$$C=\frac{\varepsilon S}{d}=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r S}{d}$$

式中　S——极板面积（m^2）；

d——极板间距离（m）；

ε_0——真空介电常数，$\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}Fm^{-1}$；

ε_r——介质的相对介电常数。

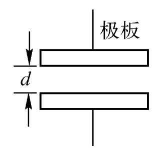


图 9-37　平板电容器

由此可以看出，当被测参数使得 S、d 或 ε 发生变化时，电容量 C

随之变化。如果保持其中两个参数不变仅改变另一参数，就可将该参数的变化单值地转换为电容量的变化。所以电容式传感器分为三种类型：变极距型、变面积型、变介电常数型。

4）压电式传感器

科学研究中发现，某些电介质在沿一定的方向受到外力作用变形时，由于内部电荷的极化现象，会在其表面产生电荷，这种现象称为压电效应。压电效应是可逆的，当在压电元件上沿着电轴的方向施加电场，压电元件将产生机械变形。如果外加电场的大小、方向发生变化，压电元件的机械变形的大小也随之相应变化，这种现象称为电致伸缩效应。

压电式传感器是一种有源传感器，它具有频响宽、灵敏度高、结构简单、体积小等优点。适合于压力、振动、加速度等动态测量。

还有霍尔传感器、热电式传感器、光电式传感器和数字式传感器等其他传感器，因篇幅问题不能一一道来。

此外，专家预计，传感网络还将成为继计算机、通信网络之后的信息产业第三次浪潮。有调研机构预测，到 2020 年，物物互联业务与现有人人互联业务之比将达到 30∶1，物物互联将成为下一个万亿级的信息产业。

传感器的微型化、数字化、多功能化、智能化和网络化等发展趋势也对传感器的制造工艺和材料提出了更高的要求。磁敏、气敏、力敏、热敏、光电、激光等多种传感器应运而生，传感器的材料也从金属发展成为半导体、陶瓷、光学纤维等材料。微型化、智能化、非接触测量和 MEMS 传感技术也将逐步取代传统的机械式、应变片式、滑动电位器等传感技术。今后各大传感器厂商在市场上的比拼重点，将是提升传感器的技术含量，扩大传感器应用范围，降低生产成本，并推动新的技术革命，促进传感器工业的发展。

9.6　技能训练 11　三相异步电动机点动与连续运行控制线路的安装

9.6.1　技能训练目标

（1）加深对三相异步电动机点动与连续运行控制线路工作原理的理解。

（2）掌握三相异步电动机点动与连续运行控制线路的安装。

9.6.2　技能训练仪器和器件

（1）电工安装工具套件。

（2）兆欧表；万用表；钳形电流表。

（3）控制板；点动与连续运行控制线路实训器套件；连接导线。

9.6.3　技能训练内容与步骤

（1）按工作原理图 9-38 所示配齐所用元器件，并进行质量检验。

（2）在实训电路板上按 9-39 所示布置图安装所有的电器元件，并贴上醒目的文字符号。

（3）按图 9-38 所示原理图进行板前明线布线和套编码套管。

（4）可靠连接电动机和按钮金属外壳的保护接地线。

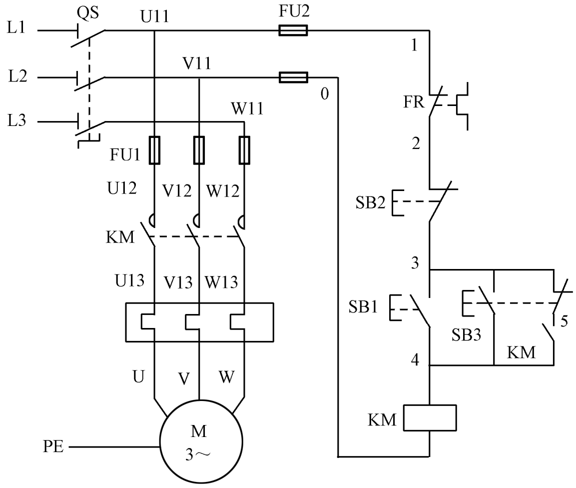


图 9-38　点动与连续运行控制电路原理图

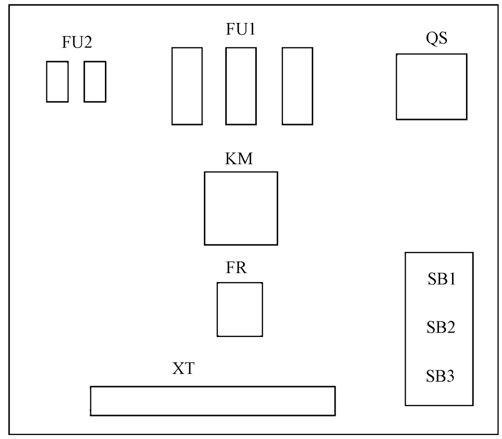


图 9-39　点动与连续运行控制线路布置图

（5）连接电源、电动机等控制板外部的导线。

（6）自检。安装完毕的控制线路板，必须按要求认真检查，确保正确无误。

（7）经指导教师同意后，由指导教师接通电源，并在现场监护学生通电试车。

（8）通电试车完毕后，停转、切断电源。

9.6.4 注意事项

（1）安装时，组合开关、熔断器的受电端子应安装在控制板的外侧；元器件排列要整齐、匀称、间距合理，且便于元器件的更换；紧固电器元器件时用力要均匀，紧固程度适当，做到既要使元器件安装牢固，又不使其损坏。

（2）做到布线横平竖直、整齐、分布均匀、紧贴安装面、走线合理；套编码套管要正确；严禁损伤线芯和导线绝缘；接点牢靠。不得松动，不得压绝缘层，不反圈及不露铜过长等。

（3）螺旋式熔断器的接线要正确，以确保用电安全。

9.6.5 创新能力的启发和培养

试考虑异步电动机降低启动电流的控制方法。

提示：可设计星形/三角形变换的控制电路、定子串电阻启动控制电路，测量启动电流，并与直接启动的电流相比较。

9.6.6 思考问题

（1）为什么钳形电流表不能一起钳入三相线测量总电流？

（2）点动与连续运行控制电路中的 SB1、SB3 按钮开关还有其他接法吗？试绘制。

（3）在用钳形电流表测量交流电流时，若读数太小，为什么将被测导线在钳口绕上几圈就可以增大读数？

9.6.7 实训要求

（1）根据图 9-38 点动与连续运行控制电路绘制连线图。

（2）记录三相异步电动机铭牌数据并说明含义。

（3）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

9.7 技能训练 12　三相异步电动机接触器连锁正反转控制线路的安装

9.7.1 技能训练目标

（1）加深对三相异步电动机接触器连锁正反转控制线路工作原理的理解。
（2）掌握三相异步电动机接触器连锁正反转控制线路的安装。

9.7.2 技能训练仪器和器件

（1）电工安装工具套件。
（2）兆欧表；万用表。
（3）控制板；接触器连锁正反转控制线路实训器套件；连接导线。

9.7.3 技能训练内容与步骤

（1）按工作原理图 9-40 所示配齐所用元器件，并进行质量检验。
（2）在实训电路板上按 9-41 所示布置图安装所有的电器元器件，并贴上醒目的文字符号。

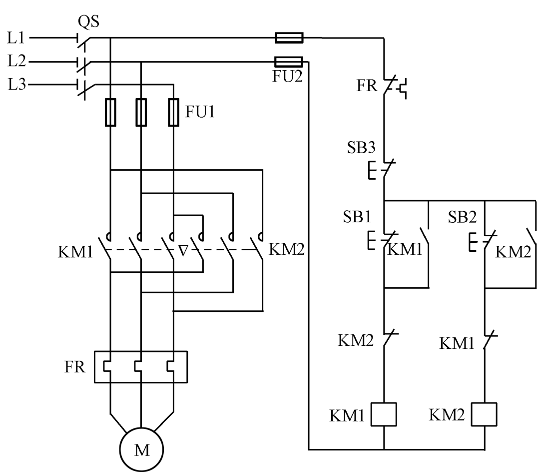


图 9-40　接触器连锁正反转控制电路原理图

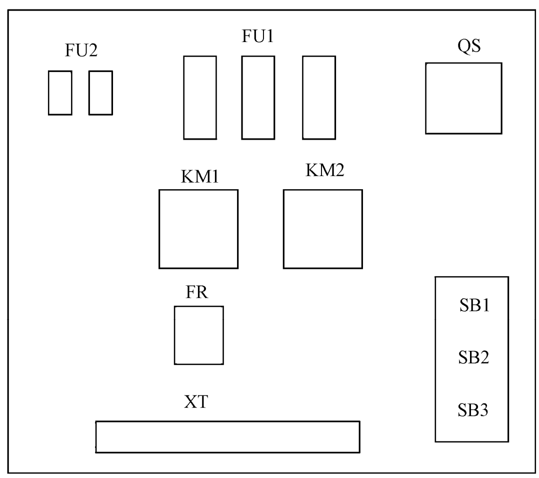


图 9-41　接触器连锁正反转控制电路元器件布置图

（3）按 9-42 所示接线图进行板前明线布线和套编码套管。
（4）可靠连接电动机和按钮金属外壳的保护接地线。
（5）连接电源、电动机等控制板外部的导线。
（6）自检。安装完毕的控制线路板，必须按要求认真检查，确保正确无误。
（7）经指导教师同意后，由指导教师接通电源，并在现场监护学生通电试车。
（8）通电试车完毕后，停转、切断电源。

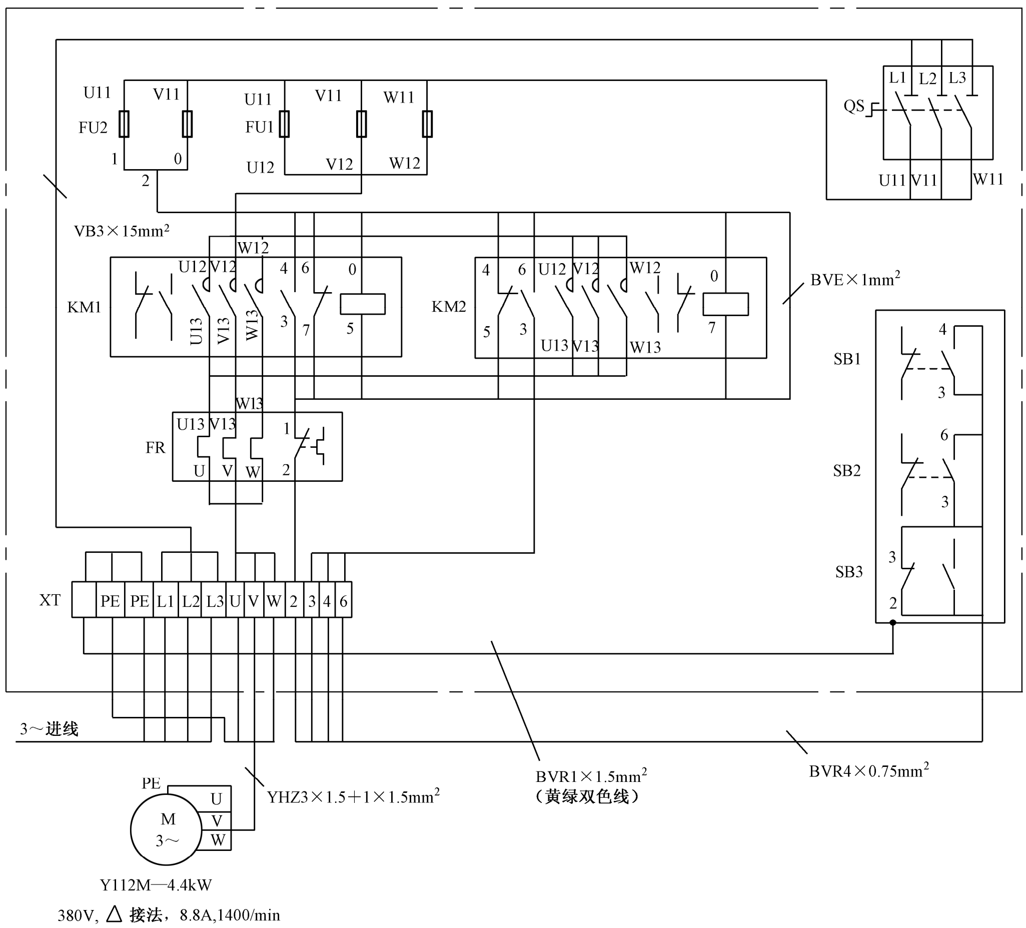


图 9-42　接触器连锁正反转控制线路接线图

9.7.4 注意事项

（1）安装时，组合开关、熔断器的受电端子应安装在控制板的外侧；元件排列要整齐、匀称、间距合理，且便于元件的更换；紧固电器元件时用力要均匀，紧固程度适当，做到既要使元器件安装牢固，又不使其损坏。

（2）做到布线横平竖直、整齐、分布均匀、紧贴安装面、走线合理；套编码套管要正确；严禁损伤线芯和导线绝缘；接点牢靠。不得松动，不得压绝缘层，不反圈及不露铜过长等。

（3）螺旋式熔断器的接线要正确，以确保用电安全。

（4）接触器连锁触头必须正确连接，否则将会造成主电路中两相电源短路事故。

（5）通电试车时，应先合上 QS，再按下 SB1（或 SB2）及 SB3，看控制是否正常，并在按下 SB1 后再按下 SB2，观察有无连锁作用。

9.7.5 创新能力的启发和培养

怎样绘制三相交流异步电动机的控制电路？

提示：学习绘制带机械连锁的正反转控制电路。再增加可以正反转点动和连续运行的控制电路。

9.7.6 思考问题

（1）什么是电气控制中的“自锁”和“互锁”？什么是电气互锁和机械互锁？分别起什么作用？

（2）比较电动机的启动电流和反转电流，哪个电流大？为什么？

（3）试比较电动机的启动电流和空载电流值，并加以说明。

9.7.7 实训要求

（1）绘制接触器连锁正反转控制线路接线图。

（2）试绘制其他控制电路图。

（3）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 9

1. 电气原理图一般由哪几个部分组成？
2. 什么是点动控制？
3. 什么是自锁？为什么说接触器自锁控制线路具有欠压保护和失压保护？
4. 在具有过载保护的接触器自锁控制线路中，它是怎么起到过载保护作用的？
5. 某生产机械要求前一台电动机启动后，后一台电动机才允许启动，而前一台电动机停止时，后一台电动机必须停止。试画出该电路的控制线路图。
6. 电动葫芦中为什么要装设行程开关 SQ1、SQ2 和 SQ3？
7. 如何识读电气控制线路原理图？

教学微视频

扫一扫

第 10 章 认识电子实训室和基本技能训练

【本章学习目标】

1. 了解电子实训室的规章制度、电源配置。
2. 掌握电子实训室的操作规程和安全用电规则。
3. 熟练掌握常用电子仪器仪表的基本使用方法。
4. 正确使用焊接工具和材料。

【教学目标】

1. 知识目标：认识电子实训室，了解电子实训室的规章制度，并掌握操作规程和安全用电规则。

2. 能力目标：电子仪器仪表的基本使用和电路焊接技能。

【教学重点】

安全用电及操作规程。

【教学难点】

电路焊接的基本技术。

【教学方法】

参观法、演示法。

10.1 电子实训室简介

电子实训是一个重要的实践教学环节，主要培养学生动手能力、创新能力、安全文明生产以及严谨踏实、科学的工作作风，使学生在实践中学习新知识、新技能、新方法，学生通过电子实训，应掌握一般的电子工艺技能、电子电路焊接工艺、常用电子元器件的选用和检测方法。实训室的配置至少能满足 50 个工位和与之相适应的装配工具及必需的仪器仪表设备，并根据专业的不同，设置不同的电子实训内容。

10.1.1 电子实训室的规章制度

实训室是进行教学和培养学生操作技能的重要基地，为了提高实训室的使用效率，确保实训教学效果，教学人员必须严格遵守下列规章制度。

（1）进入实训室应统一着工作服，严禁工作服和便装混穿，做到着装整齐划一。

（2）实训教师无特殊情况不得擅自离开岗位。学生编号与工位相对应，实训学生未经允许不得私自串位。

（3）严格遵守实训操作规程，提高安全意识，避免随意性、盲目性操作，预防触电、烫伤、挤压等事故的发生。

（4）爱护实训室的基础设施、电子设备、仪器仪表、工具器材，并养成节约原材料的良好习惯，如有丢失、损坏等情况，将酌情赔偿损失。

（5）未经管理人员允许，实训室内的仪器、仪表、工具不准随意挪动位置，不准私自拿出实训场外。

（6）在实训室内不准阅读其他书籍、听 MP3、禁止使用手机；不得携带食品、饮料、提包、手袋进入实训室。

（7）严禁在实训室内大声喧哗、吸烟、随地吐痰和乱扔纸屑等，应保持良好的实训环境。

（8）实训结束后，学生要整理好自己的工位，指导教师应检查设备、工具和仪器仪表的数量及完好率，并履行好实训室的各种登记手续。

10.1.2　电子实训室的操作规程

操作规程就是创造一种规范安全。清洁明亮、秩序井然、能稳定人的情绪，符合最佳布局的良好环境，使操作者养成标准程序和工艺要求进行认真操作的职业规范。

（1）实训前认真阅读实训指导书，明确实训操作安全注意事项及实训目的和实训步骤。

（2）实训前应认真检查本组仪器、设备及电子元器件，若发现缺损或异常现象，应立即报告指导教师处理。

（3）实验前，确认一切正常后，由教师合闸送电，不允许学生随意合闸送电。

（4）实验时，不得私设实训内容，严禁扩大实训范围（如乱拆元器件、随意短接等）。

（5）焊接过程中所用的发热工具按指定位置摆放，防止发生烫伤或酿成火灾。

（6）使用工具、仪器仪表时，动作要适度规范，严禁野蛮操作。

（7）实训中遇到电器的熔丝被熔断时，应在教师指导下更换相同规格的熔丝，禁止用铝、铜等金属丝代替。

（8）实训结束，应先关仪器电源开关，再拔下电源插头，避免仪器受损。

10.1.3　电子实训室安全用电规则

安全用电是实训室始终需要注意的重要问题。为了做好实训，确保人身和设备的安全，在做电子实训时，应时刻注意安全用电。

（1）工作台面上应铺设绝缘垫，台体、用电设备等都应接好安全保护地线；发现用电设备、电源线等出现损坏现象时，应立即报告，由相关人员及时进行处理。

（2）接线、改接、拆线都必须在切断电源的情况下进行，即“先接线后通电，先断电再拆线”。

（3）在电路通电情况下，人体严禁接触电路不绝缘的金属导线或连接点等带电部位，更不能用手接触导电部位来判断是否带电。万一遇到触电事故，应立即切断电源，进行必要的处理。

（4）设备、工具、仪器等所用的各种插头要保持完好，不用时应拔掉。拔时要捏住插头的绝缘部位，而不能拉线。

（5）在实训中，特别是设备刚投入运行时，要随时注意仪器设备的运行情况，发现漏电掉闸时，切勿重新合闸，而应由相关人员排除漏电故障后，方可重新合闸。

（6）发现电源及用电设备有打火、冒烟、过热、异味、异声等，应迅速切断开关，再进行检修。

（7）实验时应精神集中，同组者必须密切配合，接通电源前必须通知同组同学，以防止触电事故。

（8）了解有关电器设备的规格、性能及使用方法，严格按额定值使用。注意仪表的种类、量程和连接使用方法，例如，不得用电流表或万用表的电阻挡、电流挡去测量电压；电流表、功率表的电流线圈不能并联在电路中等。

10.1.4 电子实训室的电源配置与仪器设备配套标准

1．电源配置

根据教学实训课题的需要，实训室的电源配置应满足技能训练要求并符合安全规定。仪器仪表所用的电源应有多种安全保护措施，例如，短路保护、过载保护、漏电保护和接地保护等。

交流电源的输入容量应大于实训室的满载电流，并留有一定的富余量。输入为三相五线 AC：380V±10%，50Hz；输出为单项 AC：220V±10%，50Hz；工作电压为 DC：0～30V/2A 可调稳压电源。

2．仪器设备配套

本配套标准根据电子类专业涵盖的主要专门化方向和职业岗位（群）要求及专业培养目标，提出了实训室设备配置基本方案，如表 10-1 所示。

表 10-1　电子实训室仪器设备基本配置推荐标准

序　号	名　　称	规格、型号及要求	单　位	数　量	备　注
1	电子装配工具套件	可完成普通电子产品组装	套	50	
2	温控电烙铁	含烙铁架	套	50	
3	投影仪	DLP 1024X768≥2000 流明	台	1	
4	计算机	适合多媒体教学应用	台	1	
5	双路直流稳压电源	EM1716A	部	25	
6	模拟式万用表	MF47 型或 MF50 型	只	50	
7	数字式万用表	具有多种保护功能和电容测量功能	只	50	
8	函数信号发生器	EM1640V	台	25	
9	高频信号发生器	工作频率：0.1～150 MHz，调幅范围：0～60%连续可调；内调幅频率：400 Hz～1 kHz	台	25	
10	晶体管图示仪	HZ3832	台	5	
11	电子低压表	DF2174B	台	25	
12	频率计	HC-F1000L	台	5	
13	双踪示波器	YB4382	部	25	

10.2 基本技能训练

在掌握了一定的电子产品制作基础之后，还必须进一步掌握一些电子产品制作的基本技能，这些技能包括掌握基本工具、常用仪器仪表的性能、特点和使用方法，以及各种元器件的检验与筛选方法等。本节主要简述常用电子仪器仪表的基本使用方法和焊接工具及材料的使用。

10.2.1　常用电子仪器仪表的基本使用方法

1. 直流稳压电源

直流稳压电源的作用是给电路提供直流功率，其品种很多，功能基本类似。现以功能较先进的 EM1700 系列直流稳压稳流电源为例说明其功能及使用方法。

1）基本功能

EM1700 系列稳压电源是实训室通用电源。Ⅰ、Ⅱ两路具有恒压、恒流功能（CV/CC），且这两种模式可随负载变化而进行自动转换。具有串联主从工作功能，I 路为主路，II 路为从路，在跟踪状态下，从路的输出电压随主路的变化而变化，这对于需要对称且可调双极性电源的场合特别适用。Ⅰ、Ⅱ两路均可输出 0～32V，0～2A 直流电源。串联工作或串联跟踪工作时可输出 0～64V，0～2A 或 0～＋32V，0～2A 的单极性或双极性电源。Ⅲ路为固定 5V，0～2A 直流电源，供 TTL 电路实验，单板机、单片机电源，安全可靠。

2）使用方法

（1）面板上根据功能色块分布，Ⅰ区内的按键为Ⅰ路仪表指示功能选择，按入时，指示该路输出电流，按出时指示该路输出电压，Ⅰ路和Ⅱ路相同。

（2）中间按键是跟踪/独立选择开关，按入时，在Ⅰ路输出负端至Ⅱ路输出正端加一短路线，开启电源后，整机即工作在主从跟踪状态。

（3）恒定电压的调节在输出端开路时调节，恒定电流的调节在输出端短路时调节设定。

（4）本仪器电源输入为三线，机壳接地，以保证安全及减小输出纹波和接地电位差造成的杂波干扰、50Hz 干扰，Ⅲ路输出为固定＋5V，Ⅰ端接机壳。

Ⅰ、Ⅱ两路输出为悬浮式，用户可根据自己的使用情况将输出接入自己系统的地电位。

串联工作或串联主从跟踪工作时，两路的 4 个输出端子原则上只允许有一个端子与机壳地直连。

2. 模拟式万用表

模拟式万用表（以下简称万用表）又称指针式万用表，是一个带有整流器的磁电式仪表，可用来测量交流及直流电压、直流电流（有的可测交流电流）和电阻，以及音频电平（分贝）、电容、电感、晶体管放大系数（h_{FE}）等派生的测量种类。它的突出特点是量程广泛、操作简单、维修方便、价格低廉，是电工电子技术工作中普及面最广、应用量最大的多用途电测仪表。模拟式万用表型号较多，下面以使用较为广泛的 MF47 型万用表为例，来说明它的基本使用方法。

1）基本功能

MF47 型是设计新颖的磁电系整流式便携式多量程万用电表。可供测量直流电流、交直流电压、直流电阻等，具有 26 个基本量程和电压、电容、电感、晶体管直流参数等 7 个附加参考量程。

2）刻度盘与挡位盘

刻度盘与挡位盘印制成红、绿、黑三色。表盘颜色分别按交流红色、晶体管绿色、其余黑色对应制成，使用时读数便捷。刻度盘共有 6 条刻度，第一条专供测电阻用；第二条供测交直流电压、直流电流用；第三条供测晶体管放大倍数用；第四条供测量电容用；第五条供测电感用；第六条供测音频电压用。刻度盘上装有反光镜，以消除视差。

除交、直流 2500V 和直流 5A 分别有单独插座之外，其余各挡只需转动一个选择开关即可，使用方便。

3）使用方法

在使用前应检查指针是否指在机械零位上，如不指在零位时，可旋转表盖的调零器使指针指示在零位上。

将测试棒红黑插头分别插入“＋”、“-”插座中，如测量交流直流 2500V 或直流 5A 时，红插头则应分别插到标有“2500V”或“5A”的插座中。

（1）直流电流测量。

测量 0.05～500mA 时，转动开关至所需电流挡，测量 5A 时，转动开关可放在 500mA 直流电流量挡上，而后将测试棒串接于被测电路中。

（2）交直流电压测量。

测量交流 10～1000V 或直流 0.25～1000V 时，转动开关至所需电压挡。测量交直流 2500V 时，开关应分别旋转至交流 1000V 或直流 1000V 位置上，而后将测试棒跨接于被测电路两端。

（3）直流电阻测量。

装上电池（R14 型 2#1.5V，以及 6F22 型 9V 各一只）。转动开关至所需测量的电阻挡，将测试棒两端短接，调整零欧姆调整旋钮，使指针对准欧姆“0”位上（若不能指示欧姆零位，则说明电池电压不足，应更换电池），然后将测试棒跨接于被测电路的两端进行测量。

准确测量电阻时，应选择合适的电阻挡位，使指针尽量能够指向刻度盘中间 1/3 区域。

测量电路中的电阻时，应先切断电路电源，如果电路中有电容，应先行放电。

当检查电解电容器漏电电阻时，可转动开关到 R×1k 挡，测试棒红表笔必须接电容器负极，黑表笔接电容器正极。

（4）音频电平测量。

在一定的负荷阻抗上，用以测量放大级的增益和线路输送的损耗，测量单位以分贝表示。音频电平与功率电压的关系式是：

$$\text{dB}=10\lg 10P_2/P_1=20\lg 10V_2/V_1$$

音频电平的刻度系数按 0dB＝1mW/600Ω 输送线标准设计。即

$$V_1=(PZ)1/2=(0.001\times 600)\times 1/2=0.775\text{V}$$

P_2、V_2 分别为被测功率或被测电压。

音频电平是以交流 10V 为基准刻度，如指示值大于＋22dB 时，可以用 50V 以上各量程测量，其指示值可按表 10-2 所示值修正。

表 10-2　电平测量范围

量程按电平刻度增加值	电平的测量范围
10V	-10～＋22dB
50V	14dB，＋4～＋36dB
250V	28dB，＋18～＋50dB
500V	34dB，＋24～＋56dB

测量方法与交流电压基本相似，转动开关至相应的交流电压挡，并使指针有较大的偏转。如被测电路中带有直流电压成分时，可在“＋”插座中串接一个 0.1μF 的隔离电容器。

（5）电容测量。

转动开关至交流 10V 位置，被测量电容串接于任一测试棒，而后跨接于 10V 交流电压电路中进行测量。

（6）电感测量。

与电容测量方法相同。

（7）三极管直流参数的测量。

① 直流放大倍数 h_{FE} 的测量。

先转动开关至晶体管调节“ ADJ ”位置上，将红、黑表笔短接，调节欧姆电位器，使指针对准 300h_{FE} 刻度线上，然后转动开关到 h_{FE} 位置，将被测的晶体管管脚分别插入晶体管测试座的 e、b、c 管座内，指针偏转所示数值约为晶体管的直流放大倍数值。NPN 型晶体管应插入 N 型管孔内，PNP 型晶体管应插入 P 型管孔内。

② 反向截止电流 I_{ceo}、I_{cbo} 的测量。

I_{ceo} 为集电极与发射极间的反向截止电流（基极开路），I_{cbo} 为集电极与基极间的反向截止电流（发射极开路）。转动开关至 R×1k 挡，将测试棒二端短路，调节零欧姆上（此时满度电流值约 90μA），分开测试棒，然后将欲测的晶体管插入管座内，此时指针的数值约为晶体管的反向截止电流值。指针指示的刻度值乘上 1.2 即为实际值。

当 I_{ceo} 电流值大于 90μA 时，可换用 R×100 挡进行测量（此时满度电流值约为 900μA）。

NPN 型晶体管应插入 N 型管孔内，PNP 型晶体管应插入 P 型管孔内。

（8）三极管引脚极性的辨别（将万用表置于 R×1k 挡）。

① 判定基极 b。由于 b 到 c、e 间分别是两个 PN 结，它的反向电阻很大，而正向电阻很小，测试时可任意取晶体管一脚假定为基极。将红表笔接“ 基极 ”，黑表笔分别去接触另两个引脚，如此时测得都是低阻值，则红表笔所接触的引脚即为基极 b，并且是 PNP 型管。如用上述方法测得均为高阻值，则为 NPN 型管。如测量时 2 个引脚的阻值差异很大，可另选一个引脚为假定基极，直至满足上述条件为止。

② 判定集电极 c。对于 PNP 型三极管，当集电极接负电压，发射极接正电压时，电流放大倍数才比较大，而 NPN 型管则相反。测试时假定红表笔接集电极 c，黑表笔接发射极 e，记下其阻值，而后红、黑表笔交换测试，将测得的阻值与第一次阻值相比，阻值小的红表笔接的是集电极 c，黑的是发射极 e，而且可判定是 PNP 型管（NPN 型管则相反）。

（9）二极管极性判别。

测试时选 R×10k 挡，黑表笔一端测得阻值小的一极为正极。万用表在欧姆电路中，红表笔为表内电池负极，黑表笔为电池正极。

注意：以上介绍的测试方法，一般都用 R×100 或 R×1k 挡，如果用 R×1k 挡，则因该挡用表内 15V 的较高电压供电，可能将被测三极管的 PN 结击穿，若用 R×1 挡测量，因电流过大（约 90mA），也可能损坏被测三极管。

4）注意事项

万用表虽然有双重保护装置，但使用时仍应遵守下列规程，避免意外损失。

（1）测量高压或大电流时，为避免烧坏开关，应在切断电源的情况下变换量程。

（2）测未知量的电压或电流时，应先选择最高挡位，待第一次读取数值后，方可逐渐转至适当位置，以取得较准读数并避免烧坏电路。

（3）偶然发生因过载而烧断保险丝时，可换上相同型号的保险丝（0.5A/250V）。

（4）测量高压时，要站在干燥绝缘板上，并单手操作，防止意外事故。

（5）电阻各挡用的干电池，应定期检查更换，以保证测量精度。平时不用万用表应将挡位盘打到交流 250V 挡；如果长期不用，应取出电池，以防止电液溢出腐蚀而损坏其他零件。

3．数字式万用表

随着电子工业的迅速发展与电子技术的不断进步，形式多样的各种数字式万用表应运而生。由于采用大规模集成电路，其功能也越来越广泛，从基本的电流、电压测量，发展到智能

化测量。这里主要介绍 DT830 型数字式万用表的使用方法。

1）基本功能

DT830 是一种小巧耐用的手持式三位半数字式万用表。三位是整数位，即能显示从 0～9 所有数字的位；半位是分数位，即表示以所能显示的最大值中的最高位数字作为分子，而用满量程的最高位的数字作为分母，形成分数值。此表最大的显示数值是＋1999，最高位数字是 1；满量程值是 2000，最高位数字是 2，故分数位是 1/2。此表可用于测量直流电压、直流电流、交流电压、交流电流、电阻值、二极管和三极管等。

2）使用方法

（1）电压的测量。

将红表笔插入“ V · Ω ”孔内，黑表笔插入“ COM ”孔内（下同），根据直流或交流电压，合理选择量程，然后将万用表的两表笔与被测电路并联。

注意：选择不同的量程，其测量精度不同。例如，测一节 1.5V 的干电池，分别选用“ 2V ”、“ 20V ”、“ 200V ”、“ 1000V ”量程测量，其显示值分别为 1.522V、1.55V、1.6V、2V。可见，不能用高量程去测量小电压。

（2）电流测试。

将红表笔插入“ mA ”插孔（若被测电流大于 200mA，则插入“ 10A ”孔内），合理选择量程，并将万用表串入被测电路中。

（3）电阻测量。

将红表笔插入“ V · Ω ”孔内，合理选择量程，将两表笔并联于被测电阻两端。

（4）二极管测试。

将红表笔插入“ V · Ω ”孔内，量程开关转至标有二极管符号的位置，两表笔与二极管的连接如图 10-1 所示。其中图 10-1（a）为正向测量，若管子正常，则显示值应为 0.5～0.8V（硅管）或 0.25～0.3V（锗管）；图 10-1（b）为反向测量，若管子正常，应显示“ 1 ”，若损坏，将显示“ 0000 ”或其他数值。

（5）三极管的测试。

① 判定基极。将量程开关旋至二极管挡，红表笔固定接某个电极，用黑表笔依次接触另外两个电极，若两次显示值基本相等（都在 1V 以下，或都显示溢出），证明红表笔所接的就是基极。如果两次显示值中，一次在 1V 以下，另一次溢出，说明红表笔接的不是基极，应该改变接法重新测量。

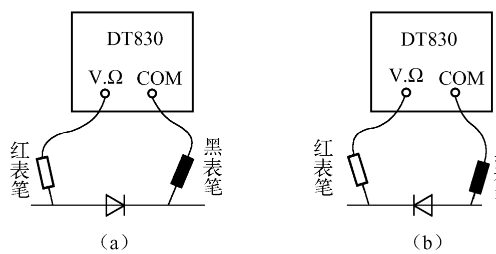


图 10-1 二极管测试

② 鉴别三极管类型。确定基极后，用红表笔接基极，用黑表笔接触其他两个电极。如果显示 0.550～0.700V，则该管为 NPN 型管，如果两次显示溢出，则该管为 PNP 型管。

③ h_{FE} 的测量。根据被测管子类型（NPN 或 PNP）的不同，将量程开关转至“ NPN ”或“ PNP ”处，再将被测管的 3 个电极插入相应的 e、b、c 孔内，此时显示屏上的读数即为“ h_{FE} ”的值。

（6）电路通、断检查。将红表笔插入“ V · Ω ”孔内，量程开关置于标“))) ”符号处（蜂鸣器挡），将两表笔接触被测电路的两端，若蜂鸣器发出响声，说明电路是通的，否则为不通。

（7）电解电容器质量的检查。将量程开关拨至蜂鸣器挡，被测电容器 C 的正极接红表笔，

负极接黑表笔，应能听到一阵短促的蜂鸣声，随即声音停止，同时显示溢出符号“ 1 ”。这是因为表内 1.5V 电压（该挡开路电压的近似值）刚开始对 C 充电时，充电电流较大，相当于通路，所以蜂鸣器发声。随着电容器两端电压不断升高，充电电流迅速减小，蜂鸣器停止发声。

经过上述测量后，再拨至 20MΩ 挡测量电容器的漏电阻，即可判断其好坏。

- 如果蜂鸣器一直响，说明电解电容器内部短路。
- 电容器的容量越大，蜂鸣器响的时间越长。
- 如果被测电容器已充好电，测量时也听不到响声。这时应先使电容器放电，然后再进行测量。

3）注意事项

（1）仪表的存放或使用应避免高温（＞40℃）、寒冷（＜0℃）、阳光直射及强烈振动。

（2）交流电压挡只能测量频率 500Hz 以下的正弦信号，读数为被测交流电压的有效值。

（3）测量晶体管的 h_{FE} 值时，由于管子工作电压仅为 2.8V，且未考虑 U_{be} 的影响，故测量值偏高，只能作为一个近似值看待。

（4）测量完毕，应立即关闭电源（OFF）。若长期不用，应取出表内电池，以免电池漏液。

4．函数信号发生器

1）基本功能

EM1640V 系列函数信号发生器，能产生正弦波、方波、三角波、脉冲波、锯齿波等波形，频率范围宽，为 0.2Hz～2MHz，最高可达 5MHz，具有直流电平调节，占空比调节，VCF 功能，具有 TTL 电平输出，可同时显示输出信号、幅度和频率，外测频时可作为频率计使用，该系列具有优良的幅频特性，方波上升≤50ns，所有电性能指标达到国外同类产品的水平，外形精巧、美观。

2）使用方法

（1）将仪器接入 AC 电源，按下电源开关。

（2）按下所需选择波形的功能开关。

（3）当需要脉冲波和锯齿波时，拉出并转动 VAR R/P 开关，调节占空比，此时频率除以 10，其他状态时关掉。

（4）当需要小信号输出时，按下衰减器。

（5）调节幅度至需要的输出幅度。

（6）调节直流电平偏移至需要设置的电平值，其他状态时关掉，直流电平将为零。

（7）当需要 TTL 信号时，从脉冲输出端输出，此电平将不随功能开关改变。

（8）VCF：把控制电压从 VCF 端输入，则输出信号频率将随输入电压值而变化。

3）注意事项

（1）把仪器接入 AC 电源之前，应检查 AC 电源是否与仪器所需的电源电压相适应。

（2）仪器需预热 10min 后方可使用。

（3）请不要将大于 10V（DC＋AC）的电压加至输出端和脉冲端。

（4）请不要将超过 10V 的电压加至 VCF 端。

5．示波器

示波器是用于观察电信号波形的电子仪器。可测量周期性信号波形的周期（或频率）、脉

冲波的脉冲宽度和前后沿时间、同一信号任意两点间的时间间隔、同频率两正弦信号间的相位差、调幅波的调幅系数等各种电参量，若借助传感器还可测非电量。下面以 YB4328 双踪示波器为例来说明示波器的基本使用。

1）基本功能

YB4328 系列示波器为便携式二踪示波器。具有 0～20MHz 的频带宽度；垂直偏转系数为 5mV/div，并可通过扩展功能键将灵敏度提高至 lmV/div。该机的扫描系统采用了全频带触发式自动扫描电路。灵活方便的触发方式具有可供分别选择某一通道信号或外输入信号触发的功能，设置有交替触发功能，该功能的设置，使本机具备了能同时观察两路不相关信号的优点。

仪器具有 TV-V 同步和触发锁定功能，可快捷稳定地观察各种信号。设有触发输入端，可随触发通道输出 CH1 或 CH2 信号，用于外接频率计等。

2）使用方法

（1）电压测量。

在测量时一般把“ VOCIS/DIV ”开关的微调装置以顺时针方向旋至满度的校准位置，这样可以按“ VOLTS/DIV ”的指示值直接计算被测信号的电压辐值。

由于被测信号，一般都含有交流和直流两种成分，因此在测试时应根据下述方法操作。

① 交流电压的测量。

当只需测量被测信号的交流成分时，应将 Y 轴输入耦合方式开关置“ AC ”位置，调节“ VOLTS/DIV ”开关，使波形在屏幕中的显示幅度适中，调节“ 电平 ”旋钮，使波形稳定，分别调节 Y 轴和 X 轴位移，使波形显示值方便读取，如图 10-2 所示。根据“ VOLTS/DIV ”的指示值和波形在垂直方向显示的坐标（DIV）。按下式读取峰-峰值：

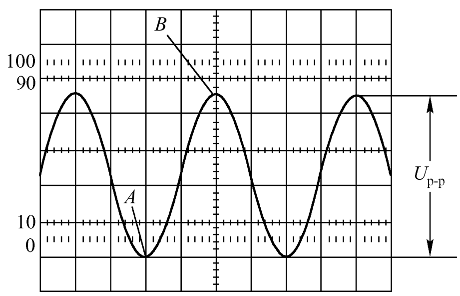


图 10-2　交流电压的测量

$$U_{p-p}=V/DIV\times H\ (DIV)$$

若 V/DIV 为 2V，根据图 10-2，则 $U_{p-p}=4.6\times2=9.2V$。

有效值

$$U=\frac{U_{p-p}}{2\sqrt{2}}$$

如果使用的探头置 10∶1 位置，应将该值乘以 10。

② 直流电压的测量。

当需要测量含直流成分的电压时，应先将 Y 轴耦合方式开关置“ GND ”位置，调节 Y 轴位移，使扫描基线在一个合适的位置上，再将耦合方式开关转换到“ DC ”位置，调节“ 电平 ”，使波形同步。根据波形偏移原扫描基线的垂直距离，用上述方法读取该信号的各个电压值，如图 10-3 所示。

若 V/DIV 为 0.5V，根据图 10-3，则 $U_{p-p}=3.7\times0.5=1.85V$。

（2）时间测量。

对其信号的周期或该信号任意两点间时间参数的测量，可首先按上述操作方法，使波形获得稳定同步后，根据该信号周期或需测量的两点间在水平方向的距离乘以“ SEC/DIV ”开关的指示值，如图 10-4 所示。

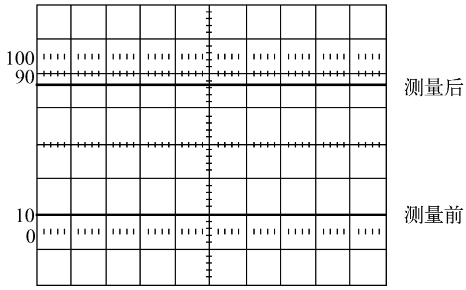


图 10-3　直流电压的测量

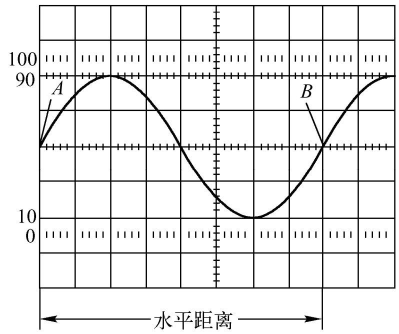


图 10-4　时间间隔的测量

测量两点间的水平距离，按下式计算出时间间隔。

$$时间间隔\ t = SEC/DIV \times D\ (DIV)$$

若扫描时间系数 SEC/DIV 设置为 2ms/格，根据图 10-4 所示，*AB* 两点的水平距离 *D* 为 8 格，则时间间隔

$$t = 2 \times 8 = 16ms$$

（3）频率测量。

对于重复信号的频率测量，可先测出该信号的周期（如图 10-4 所示，*AB* 两点的时间间隔正好是该正弦波的一个周期 *T*)，再根据以下公式计算出频率值。

$$f = \frac{1}{T}$$

6．电子电压表

电子电压表又叫毫伏表，它的种类很多，根据测量信号频率的高低，可分为低频、高频和超高频毫伏表。现以 DF2174B 型低频晶体管毫伏表为例说明其使用方法。

1）基本功能

DF2174B 为单通道单针毫伏表，适用于 30μ～100V、10～1MHz 交流信号电压有效值测量。测量精度高，输入阻抗高，且有监视输出功能，可用做放大器使用。

2）使用方法

（1）通电前，先调整电表指针的机械零位。

（2）接通电源，按下电源开关，发光二极管灯亮仪器立刻工作。为了保证性能稳定，可预热 10min 后使用，开机后 10min 内指针无规则摆动数次是正常的。

（3）先将量程开关置于适当量程，再加入测量信号。若测量电压未知，应将量程开关置最大挡，然后逐级减小量程。

（4）当输入电压在任何一量程挡指示为满度值时，监视输出端的输出电压为 0.1V。

（5）若要测量高电压时，输入端黑柄鳄鱼夹必须接在“ 地 ”端。

10.2.2　焊接工具和材料的使用

1．焊接工具的使用

电烙铁是手工焊接的基本工具，主要用于焊接元件。它是根据电流通过发热元件产生热量的原理制成的。

1）电烙铁的类型

电烙铁种类主要有：内热式、外热式、恒温式电烙铁，吸锡电烙铁等。

电烙铁的发热功率有 20W、30W、45W、75W、100W、300W、500W 等多种。电子产品制作中最常用的是内热式电烙铁，功率一般为 20W。

2）内热式电烙铁的构造

所谓内热式电烙铁是指烙铁芯在烙铁头的里面，由内向外加热烙铁头。所以相对于外热式电烙铁而言，内热式电烙铁升温快、热效率高，烙铁头温度达 350℃左右，一般 20W 内热式电烙铁相当于 25～40W 的外热式电烙铁。由于其体积小、重量轻、发热快、耗电少、使用灵活等特点，被广泛应用于小型电子元器件组成的印制电路板的焊接。内热式电烙铁的构成如图 10-5 所示。其常见的规格有 20W、25W、30W、35W、50W 等。

3）电烙铁的使用方法

电烙铁的使用有一定的技巧，若使用不当，不仅焊接速度慢，而且会影响焊接质量。

（1）新烙铁镀锡方法。接上电烙铁电源，当烙铁头温度逐渐升高时，将松香涂在烙铁头上，待松香冒烟、烙铁头开始能够熔化焊锡的时候，将烙铁头放在有少量松香和焊锡的砂布上研磨，使烙铁头的四周都镀上一层焊锡即可。

（2）烙铁头磨损的修整方法。烙铁头经长期使用后，往往因出现氧化层而导致其表面凹凸不平，这时，就需要对其进行修整。可用锉刀将烙铁头修整成所要求的形状后，再用砂纸将其打磨光。修整后的烙铁头，再采用上述镀锡的方法，使打磨过的表面镀上锡以后再继续使用。

（3）电烙铁的握法。基本的握法如图 10-6（a）所示，这种姿势与握笔的姿势相似，称为握笔式。图 10-6（b）是“ 拳握式 ”，适用于焊接大型电气设备。电烙铁在使用间歇中，应将其放在烙铁架上。

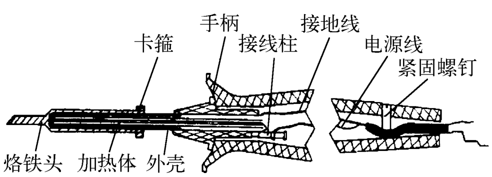
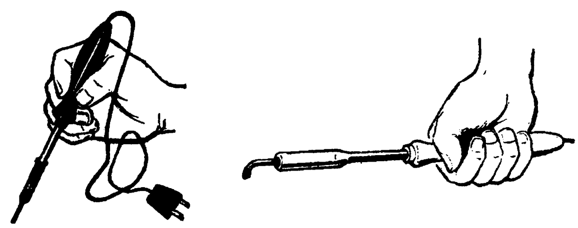


图 10-5　内热式电烙铁结构示意图



（a）　（b）

图 10-6　电烙铁的常用握法

（4）安全知识。电烙铁的电源线应选用纤维编制花线或橡皮软线，电源线与烙铁外壳之间的绝缘电阻应为∞或大于 5MΩ，否则不能投入使用；发现烙铁头松动要及时紧固，否则容易造成电源线与烙铁芯引出接线柱之间的连接线绞断，出现脱落或短路；在使用过程中，应严禁甩锡，以防焊锡飞溅伤人。

2．焊接材料的使用

1）焊料

凡是用来焊接两种或两种以上的金属面，使之成为一个整体的金属或合金都叫焊料。焊料的种类很多，按其组成成分，焊料有锡铅焊料、银焊料和铜焊料等。按其熔点可分为软焊料（熔点在 450°C以下）和硬焊料（熔点在 450°C以上）。在电子产品装配中，一般都选用锡铅焊料，它是一种软焊料。锡可以与其他金属组成二元合金、三元合金或四元合金。

（1）锡铅焊料的优点。

① 熔点低。降低了焊接温度，可减少元器件受热损坏的机会。尤其是对温度敏感的元器件影响较小。

② 熔流点一致。共晶焊锡只有一个熔流点，由液体直接变成固体，结晶迅速，这样可以

减少元器件的虚焊现象。

③ 流动性好，表面张力小。焊料能很好地填满焊缝，并对工件有较好的浸润作用，使焊点结合紧密光亮。

④ 抗拉强度和剪切强度高，导电性能好，电阻率低。

⑤ 抗腐蚀性能好。锡和铅的化学稳定性比其他金属好，抗大气腐蚀能力强，而共晶焊锡的抗腐蚀能力更好。

（2）杂质对焊接的影响。

锡焊过程中由于含有微量的其他元素，往往会影响锡焊的熔点、导电性及力学强度等性能，造成焊接质量的下降，另外，为了使焊接获得某些性能，也可掺入某些金属。

① 铜。铜的成分来源于印制板的焊盘和元器件的引线，以及焊料中的微量铜元素。随着铜含量的增加，造成焊料熔点增高，黏度加大，焊点产生桥连、拉尖等缺陷。所以一般铜含量应控制在 0.1%～0.5%范围内。

② 铝。铝可以使焊料的流动性变差，焊点失去光泽，并产生氧化和腐蚀。

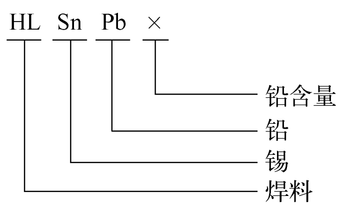
③ 锑。锑是焊料中的重要组成部分，少量的锑可增大焊锡的力学强度，但会使焊锡变脆，降低流动性。

④ 锌。锌可降低焊料的流动性，使焊料失去光泽，焊点易造成拉尖和桥连。

总之，焊料中的微量金属超过一定限量，就会影响焊接的电气性能和力学性能。因此，要根据实际工作需要，选择合适的焊料。

（3）常用锡铅焊料。

常用锡铅焊料有管状焊锡丝、抗氧化焊锡、含银焊锡、焊膏和不同配比的锡铅焊料。手工焊接一般采用管状焊锡丝，管状焊锡内部加有助焊剂，按焊锡丝直径分为 0.5mm、0.8mm、0.9mm、1.0mm、1.2mm、1.5mm、2.0mm、3.0mm、4.0mm、5.0mm，其标注方法如下：



例如，HL　Sn　Pb　39 表示铅占 39%的锡铅焊料。

2）助焊剂

（1）助焊剂的作用。

① 除去氧化物。为了使焊料与工件表面的原子能充分接近，必须将妨碍两金属原子接近的氧化物和污染物去除，助焊剂正具有溶解这些氧化物、氢氧化物或使其剥离的功能。

② 防止工件和焊料加热时氧化。焊接时，助焊剂先于焊料之前熔化，在焊料和工件的表面形成一层薄膜，使之与外界空气隔绝，起到在加热过程中防止工件氧化的作用。

③ 降低焊料表面的张力。使用助焊剂可以减小熔化后焊料的表面张力，增加其流动性，有利于浸润。

（2）对助焊剂的要求。

① 常温下必须稳定，熔点应低于焊料熔点。

② 在焊接过程中具有较高的活化性，较低的表面张力，黏度和比重应小于焊料。

③ 不产生有刺激性的气味和有害气体，熔化时不产生飞溅或飞沫。

④ 绝缘好、无腐蚀性、残留物无副作用，焊接后的残留物易清洗。

⑤ 形成的膜光亮（加消光剂的除外）、致密、干燥快、不吸潮、热稳定性好，具有保护工

件表面的作用。

（3）助焊剂的分类及其应用。

① 无机类助焊剂。无机类助焊剂腐蚀性最强，去除氧化膜的能力最强，但容易损伤焊盘及被焊元器件引线。一般电子产品的焊接不使用无机类助焊剂。

② 有机类助焊剂。有机类助焊剂有较好的助焊作用，但其去除氧化膜能力以及腐蚀性次于无机类助焊剂，而且其焊接过程产生的挥发性气体对人体有伤害。

③ 松脂类助焊剂。松脂类助焊剂的作用虽不如无机类和有机类，但由于其对焊盘和元器件引线没有腐蚀性，且具有一定去除氧化膜的作用，因此，在现代电子产品的装配焊接中得到了广泛应用，管状焊锡内就填充了松脂类助焊剂。

3）阻焊剂

阻焊剂是一种耐高温的涂料，可将不需要焊接的部分保护起来，致使焊接只在所需要的部位进行，以防止焊接过程中的桥连、短路等现象发生，对高密度印制电路板尤为重要。阻焊剂可降低返修率，节约焊料，使焊接时印制电路板受到的热冲击小，板面不易起泡和分层。常见到的印制电路板上的绿色涂层即为阻焊剂。

阻焊剂的种类有热固化型阻焊剂、紫外线光固化型阻焊剂（又称光敏阻焊剂）和电子辐射固化型阻焊剂等几种，目前常用的是紫外线光固化型阻焊剂。

10.3 技能训练 13　电路焊接的基本技术

10.3.1 技能训练目标

（1）通过本课题的技能训练，使学生掌握手工焊接的一般方法。

（2）掌握电子元器件的安装、焊接工艺和操作步骤。

（3）对不同方式的焊接能够熟练地进行操作。

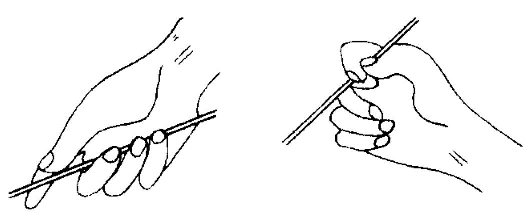
10.3.2 技能训练仪器和器件

电烙铁；烙铁架；镊子；尖嘴钳；斜口钳；剥线钳；刮线刀；焊锡丝；砂纸；电阻器、电容器、晶体管、集成电路等各种电子元器件；万能印制电路板；松香酒精助焊剂。

10.3.3 技能训练内容与步骤

1．焊锡丝的拿握方法

焊锡丝有连续送锡拿法和间断送锡拿法两种，连续送锡拿法是靠拇指和食指捻动，使焊锡丝连续送出，适于批量较大的流水作业等，如图 10-7（a）所示。这种拿法一般都是使用整卷焊锡丝，因此可节省焊料。另一种是间断送锡拿法，是将焊锡丝按需要截成一段，这种拿法容易造成焊锡丝的浪费，但比较好控制焊料的使用总量，如图 10-7（b）所示。手工焊接时一般是左手拿握焊锡丝，右手拿握电烙铁，电烙铁的握法如图 10-6 所示。



（a）连续送锡拿法　　（b）间断送锡拿法

图 10-7　焊锡丝的拿握方法

2．手工焊接的步骤

按照焊盘大小，手工焊接的步骤可分成五步

焊接操作法和三步焊接操作法两种。三步焊接操作法适用于焊盘较小的焊接，五步焊接操作法适用于焊盘较大的焊接。

五步焊接操作法的操作内容包括准备、加热、送锡、撤锡、撤电烙铁五步。

（1）准备。焊接前的主要准备工作是检查电烙铁和选择合适的焊锡丝。电烙铁要具有良好的保护接地，烙铁头要保持清洁；焊锡丝直径要与被焊件及焊盘大小相适应，如图 10-8（a）所示。

（2）加热。加热是指加热被焊件引线及焊盘，加热时要保证元器件引线及焊盘同时受热，同时达到焊接温度。因此，电烙铁头加热时要沿 45 °方向紧贴元器件引线并与焊盘紧密接触，如图 10-8（b）所示。

（3）送锡。送焊锡丝是控制焊点大小的关键一步，送锡过程要观察焊点的形成过程，控制送锡量。需注意，焊锡丝应从烙铁的对侧加入，而不是直接加在烙铁头上，如图 10-8（c）所示。

（4）撤锡。当焊盘上形成适中的焊点后，要将焊锡丝及时撤离。撤离时速度要快，且焊锡丝应始终与焊盘呈 45 °夹角，如图 10-8（d）所示。

（5）撤离电烙铁。撤离电烙铁时要先慢后快，否则焊点收缩不到位容易形成拉尖，撤离方向要与焊盘呈 45 ° 夹角，如图 10-8（e）所示。

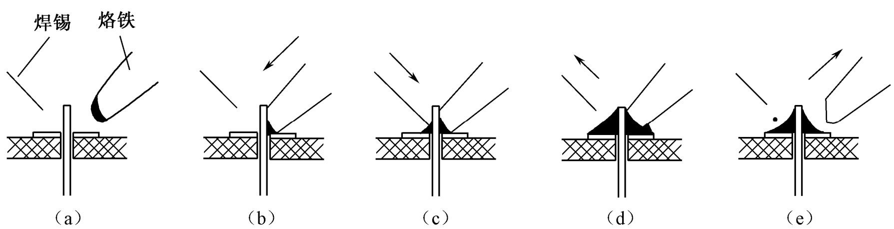


图 10-8　五步焊接法操作图

三步焊接操作法，是将上述五步法中的加热与送锡、撤锡与撤离电烙铁同时进行。需要注意的是按三步焊接操作时，由于焊盘比较小，因而加热与送锡、撤锡与撤离电烙铁的速度都要快，尽量缩短时间，焊接时间一般以 2～3s 为宜，这样才能保证焊接质量。

3．检查修整电烙铁

对初次使用和长期放置未用的电烙铁，使用前检查电烙铁的电源线绝缘层是否破损、烙铁头是否平整和氧化。若烙铁头刃口不平整、氧化，可用锉刀锉平刃口，用砂纸打磨氧化层，重新给烙铁刃口镀上一层薄锡。

4．去除元器件引脚氧化物

观察万能电路板是否氧化，若氧化则用橡皮擦干净氧化物；观察所用元器件引脚是否氧化，如果因某些原因，元器件引脚表面出现氧化时，可用刀片从离开元器件根部 3mm 以上的地方开始，延着引脚的方向，边刮边转动引脚，直到把引脚上的氧化物彻底刮净为止。对于表面镀合金的元器件引脚，不能用刀刮，可用橡皮擦去氧化层。

5．浸锡

将元器件的引脚蘸上助焊剂，然后插入盛有熔融状态锡、铅合金的锡锅中 1～2s，使元器件引脚表面形成一层薄薄的均匀光滑的涂层。

6．元器件的整形

用尖嘴钳或镊子夹住靠近元器件的引脚根部，然后用手将引脚弯曲，一般弯弧距元器件 3～

5mm，两脚折弯的方向要一致，且要保证装配后元器件印有字的部位向上或在较易观察的方向上，如图 10-9 所示。

7．在印制电路板上安装元器件

将已整形的元器件插入万能电路板中，元器件在基板一面，引脚在铜箔一面。小元器件根部距印制电路板 3～5mm 间距，较大、较重元器件安装时要插到底，或在元器件与印制电路板间加一橡皮垫，如图 10-10 所示。装配好的元器件要横平竖直、高度一致、整齐美观。

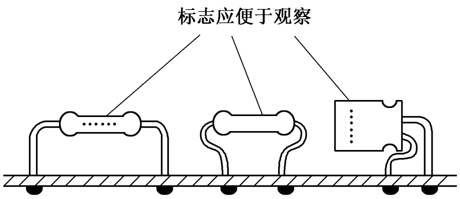


图 10-9　元器件的整形

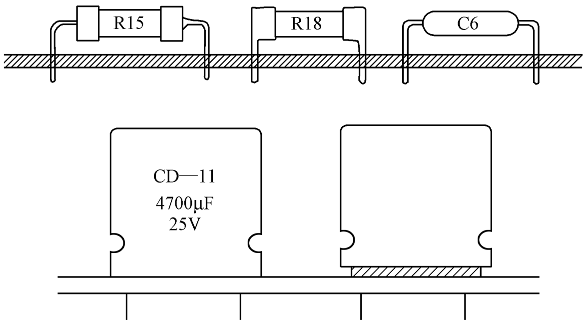
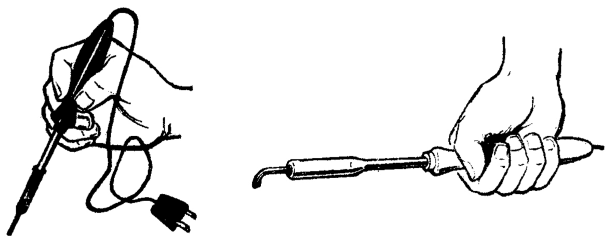


图 10-10　在印制板上安装元器件

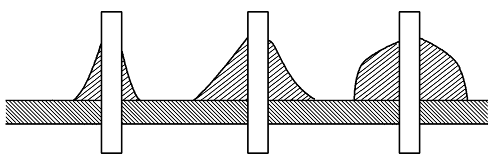
8．元器件焊接

右手用握笔式握住电烙铁，左手用拇指、食指和中指夹住焊锡丝，如图 10-11 所示。将烙铁头放置在焊接点上，使焊点升温。焊点经过加热达到一定温度后，立即将左手中的焊锡丝从烙铁头的对称侧触到被焊件上。当焊锡丝熔化适量后，迅速移开焊锡丝。当焊料扩散范围达到要求后，焊剂尚未完全挥发，焊锡最光亮时，烙铁头沿 45 °角方向移动，在将要离开焊点时快速往回一带，烙铁头随即迅速撤离。每一个焊点焊接时间为 1～3s。要求焊点大小适中，表面光滑、清洁无毛刺及空隙，如图 10-12 所示。



（a）握笔式　　（b）抓握式

图 10-11　电烙铁的常用握法



（a）焊料不足　（b）焊料适当　（c）焊料过多

图 10-12　焊点形状的比较

9．焊后处理

剪去多余的引脚，使元器件引脚露出焊盘 2mm。检查电路板上所有元器件引脚焊点，修补缺陷。

10.3.4 注意事项

（1）控制好焊接温度。电烙铁温度的高低，可从电烙铁头与松香接触时的情况来判断。当电烙铁头蘸上松香后冒柔顺的白烟，松香向烙铁头的面上扩展，而又不“ 吱吱 ”作响，此时是最好的焊接状态，焊点光亮。若松香只是在烙铁头上缓慢融化发出青烟，表明温度低，焊点像豆腐渣一样。

（2）控制好焊接时间。如果加热时间太短，助焊剂未能充分发挥，焊剂和金属之间形成焊剂隔层，焊锡不能将焊盘充分覆盖，形成松香灰渣，造成虚焊。如果加热时间过长，助焊剂全部发挥，撤离电烙铁时容易造成锡尖，同时焊点发白，失去光泽，表面粗糙，还会造成焊盘脱落，又易烫坏元器件。

（3）应加热工件，而不应加热焊丝。要将烙铁头以最大的接触面加热被焊工件，然后将焊锡丝放入烙铁头与工件的间隙中，让锡液流动而焊接。

（4）随时保持烙铁头清洁。经常擦除烙铁头上的氧化物及灰渣，提高烙铁头的热量传送效率。

（5）电烙铁不使用时，不要长期通电，以防损坏电烙铁。

10.3.5　创新能力的启发和培养

试考虑怎样干净整洁拆除已焊接的元器件。

提示：采用吸锡器或其他方法除去焊锡，便于换接电子元器件。

10.3.6　思考问题

（1）什么是“虚焊”？为什么电子元器件的焊接要防止虚焊？

（2）外热式电烙铁与内热式电烙铁有何区别？

（3）焊接分哪几步？

10.3.7　实训要求

（1）认真总结焊接的方法。

（2）回答思考问题。

（3）总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 10

1. 电子实训室的主要仪器有哪些？
2. 怎样正确使用数字万用表、信号发生器和电子电压表？
3. 怎样正确使用示波器测量各种参数？
4. 如何训练掌握手工焊接的技能？

教学微视频

扫一扫

第 11 章　常用半导体器件

【本章学习目标】

1. 了解半导体的基本知识，理解 PN 结的单向导电性。

2. 掌握二极管的图形符号、文字符号、单向导电性能、主要参数和简单判别。

3. 理解三极管的电流放大作用和特性曲线、主要参数，掌握三极管的图形符号、文字符号以及常用三极管的识别和简单测试方法。

4. 了解稳压二极管、发光二极管、光电二极管、开关二极管、变容二极管和晶闸管的基本特点。

【教学目标】

1. 知识目标：熟练掌握常用半导体器件的名称、符号、用途和检测方法。

2. 能力目标：会识别、检测常用半导体器件。

【教学重点】

半导体二极管与三极管的结构、符号和主要参数。

【教学难点】

三极管的管型、引脚和管材的判断。

【教学方法】

分析法、演示法、实验法、练习法。

11.1　半导体基础知识

在日常接触的物质中，一类是电阻率很小、容易导电的金属，如金、银、铜、锡等，这类物质称为导体；另一类是电阻率很大，几乎不能导电的物质，如橡胶、陶瓷、玻璃等，这类物质叫绝缘体。但是在自然界里面，还有一些物质，它们的导电本领即电阻率，处在导体和绝缘体之间，这种物质称为半导体。目前用来制造晶体管的材料主要有锗、硅等。

11.1.1　半导体的导电方式

导体、半导体和绝缘体导电性能的差异，在于它们内部运载电荷的粒子——载流子的浓度不同。金属导体内的载流子只有一种，就是自由电子，而且数目很多，所以有良好的导电性能。绝缘体中的载流子数目很少，所以几乎不导电。半导体中载流子有两种：一种是带负电的自由电子，另一种是带正电的空穴，它们数目相等，但总数不多，远远低于金属导体中载流子的数量，所以半导体的导电性能比导体差，但比绝缘体好。

在金属导体中导电的是自由电子，而在半导体中，电子和空穴是同时参与导电的，这是半导体导电的重要特征。

11.1.2 N 型半导体和 P 型半导体

在纯净半导体中掺入某种微量元素后称为掺杂半导体，它的导电能力与纯净半导体相比，将增加几万乃至上百万倍。根据掺杂半导体导电粒子的不同，半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1．N 型半导体

N 型半导体又称为电子型半导体。是在纯净半导体中掺入微量的五价元素（如磷元素）制成的，其中含有数量较多的带负电的自由电子，还有少量的带正电的粒子（称为空穴）。即在 N 型半导体中电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

2．P 型半导体

P 型半导体又称为空穴型半导体。是在纯净半导体中掺入微量的三价元素（如硼元素）制成的，其中含有数量较多的带正电的粒子（称为空穴），还有少量的带负电的自由电子。即在 P 型半导体中空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。

11.1.3 PN 结及其单向导电性

1．PN 结的形成

在一块完整的硅片上，用不同的掺杂工艺使其一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体，那么，在两种半导体交界面附近就形成了 PN 结，如图 11-1 所示。

由图可知：PN 结在 P 型材料（P 区）一侧带负电；在 N 型材料（N 区）一侧带正电；形成一个内电场，该电场方向是由 N 区指向 P 区。通常内电场的数值，对硅材料来说约为 0.7V，锗材料约为 0.3V。

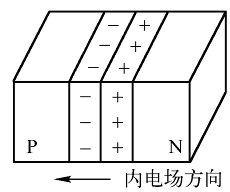


图 11-1　PN 结的形成

2．PN 结的单向导电性

当电源正极接 P 区，负极接 N 区时，称为给 PN 结加正向电压或正向偏置，如图 11-2 所示。由于 PN 结是高阻区，而 P 区和 N 区的电阻很小，所以正向电压几乎全部加在 PN 结两端。在 PN 结上产生一个外电场，其方向与内电场相反，在它的推动下，N 区的电子要向左边扩散，并与原来空间电荷区的正离子中和，使空间电荷区变窄。同样，P 区的空穴也要向右边扩散，并与原来空间电荷区的负离子中和，使空间电荷区变窄。结果使内电场减弱，破坏了 PN 结原有的动态平衡。于是扩散运动超过了漂移运动，扩散又继续进行。与此同时，电源不断向 P 区补充正电荷，向 N 区补充负电荷，结果在电路中形成了较大的正向电流 I_F。而且 I_F 随着正向电压的增大而增大。

当电源正极接 N 区、负极接 P 区时，称为给 PN 结加反向电压或反向偏置，如图 11-3 所示。反向电压产生的外加电场的方向与内电场的方向相同，使 PN 结内电场加强，它把 P 区的多子（空穴）和 N 区的多子（自由电子）从 PN 结附近拉走，使 PN 结进一步加宽，PN 结的电阻增大，打破了 PN 结原来的平衡，在电场作用下的漂移运动大于扩散运动。这时通过 PN 结的电流，主要是少子形成的漂移电流，称为反向电流 I_R。由于在常温下，少数载流子的数量不多，故反向电流很小，而且当外加电压在一定范围内变化时，它几乎不随外加电压的变化而变化，因此反向电流又称为反向饱和电流。当反向电流可以忽略时，就可认为 PN 结处于截止状态。

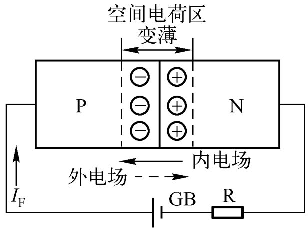


图 11-2　PN 结加正向电压

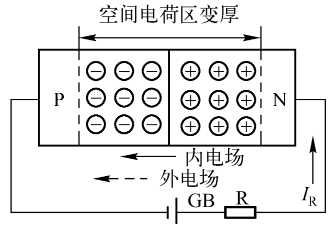


图 11-3　PN 结加反向电压

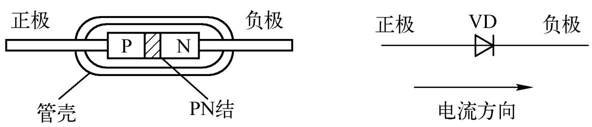
综上所述，PN 结正偏时，正向电流较大，相当于 PN 结导通，反偏时，反向电流很小，相当于 PN 结截止。这就是 PN 结的单向导电性。

11.2 半导体二极管

11.2.1 二极管的结构、符号和类型

1．结构和符号

二极管是由一个 PN 结构成的半导体器件，即将一个 PN 结加上两条电极引线做成管芯，并用管壳封装而成。P 型区的引出线称为正极或阳极，N 型区的引出线称为负极或阴极，它的文字符号为“ VD ”，图形符号如图 11-4 所示，图形中箭头表示 PN 结正向电流的方向。

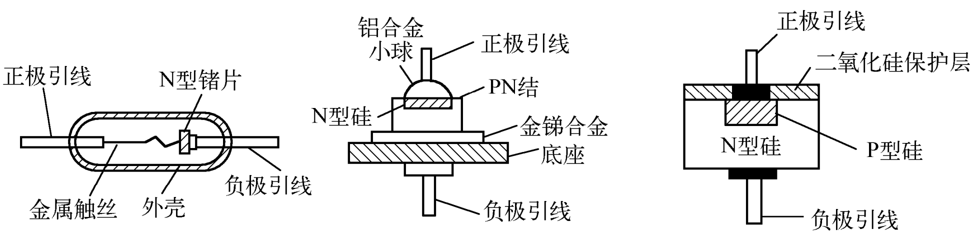


（a）　　　　（b）

图 11-4　二极管结构与符号

2．二极管的类型

二极管有许多类型，根据制作材料的不同，二极管可分为硅管和锗管；按工艺可分为点接触型、面接触型和平面型，如图 11-5 所示；按用途可分为整流二极管、检波二极管、光电二极管、开关二极管、激光二极管等。



（a）点接触型　　（b）面接触型　　（c）平面型

图 11-5　二极管结构类型

11.2.2 二极管的伏安特性曲线

二极管的伏安特性曲线就是二极管两极所加电压与电流的关系曲线。如图 11-6 所示为典

型的二极管伏安特性曲线。二极管最重要的特性是单向导电性，下面用其伏安特性来描述。

1．正向导通特性

由图可以看出，当所加的正向电压为零时，电流为零；当正向电压较小时，由于外电场远不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动所造成的阻力，故正向电流很小（几乎为零），二极管呈现出较大的电阻。这段曲线称为死区。

当正向电压超过一定数值后（硅管为 0.5V，锗管为 0.2V，称为死区电压），流过二极管的电流随着电压的升高而明显增加，二极管的电阻变得很小，进入导通状态。导通后二极管两端的正向压降几乎不随流过其电流的大小而变化，硅管的正向压降约为 0.7V，锗管约为 0.3V。

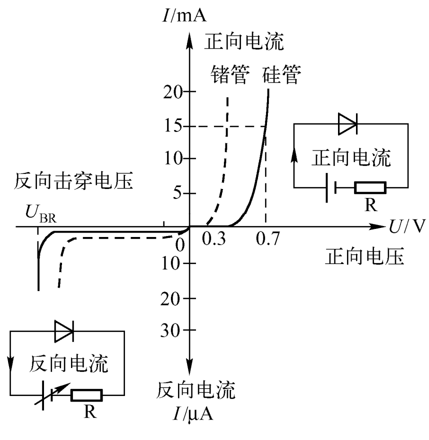


图 11-6　二极管的伏安特性曲线

2．反向截止特性

当二极管两端外加反向电压时，PN 结内电场进一步增强，使扩散更难进行。这时只有少数载流子在反向电压作用下的漂移运动形成微弱的反向电流 I_R。反向电流很小，且在一定的范围内几乎不随反向电压的增大而增大。但反向电流是温度的函数，将随温度的变化而变化。常温下，小功率硅管的反向电流在 nA 数量级，锗管的反向电流在 μA 数量级。

3．反向击穿特性

当反向电压增大到一定数值 U_{BR} 时，反向电流剧增，这种现象称为二极管的击穿，此时的 U_{BR} 电压值称为击穿电压。U_{BR} 视不同二极管而定，普通二极管一般在几十伏以上，且硅管较锗管高。

击穿特性的特点是，虽然反向电流剧增，但二极管的端电压却变化很小，这一特点成为制作稳压二极管的依据。

综上所述，二极管的伏安特性具有以下特点：

（1）二极管具有单向导电性；

（2）二极管的伏安特性具有非线性。

11.2.3　二极管的主要参数

用来表示二极管的性能好坏和适用范围的技术指标，称为二极管的参数。为了保证二极管正常安全的工作，选用二极管时主要考虑以下两个参数。

1．最大整流电流 I_{FM}

最大整流电流是指二极管长期连续工作时允许通过的最大正向电流值。因为电流通过管子时会使管芯发热，温度上升，就会使管芯过热而损坏。所以，使用二极管时不要超过二极管额定正向工作电流值。

2．最高反向工作电压 U_{RM}

加在二极管两端的反向电压高到一定值时，会将管子击穿，失去单向导电能力，这个电压就称为最高反向工作电压。一般规定最高反向工作电压为反向击穿电压的 1/2 或 1/3。

二极管的主要参数可查阅有关手册。不同类型的二极管参数是不同的，查阅参数时还应注意它们的测试条件。

11.2.4 二极管的识别和简易检测方法

1．二极管的识别

小功率二极管的 N 极（负极），一般会在二极管表面上采用一种色圈标出来；有些二极管也用二极管专用符号来表示 P 极（正极）或 N 极（负极）；也有采用符号标志为“ P ”、“ N ”来确定二极管极性的。

2．二极管的简易检测方法

根据二极管的单向导电特性，即正向电阻小，反向电阻大的特点，测量时，把万用表拨至 R×100 或 R×1k“ 欧姆挡 ”，然后用万用表的两支表笔分别与二极管的两个电极相接，若电阻值很小，则与黑表笔相接的一端为二极管的正极；若电阻值很大，则与黑表笔相接的一端为二极管的负极。

若测量的二极管的正、反向电阻都很小，则说明二极管内部短路；若测量的二极管的正、反向电阻都很大，说明二极管内部断路。若测量二极管的正、反向电阻大致相等，则说明二极管的性能不好。

11.3 半导体三极管

11.3.1 三极管的结构、符号和类型

1．结构和符号

半导体三极管也称为晶体管，它是电子线路中的主要放大元器件。其结构示意图如图 11-7 所示，它是由两个 PN 结组成，从而形成三个区域：集电区、基区和发射区。基区和集电区之间的 PN 结称为集电结，基区和发射区之间的 PN 结称为发射结。由集电区、基区和发射区各引一个电极，分别称为集电极、基极和发射极，依次用 C、B 和 E 表示。根据三个区半导体材料类型的不同，三极管可分为 PNP 型和 NPN 型两大类。基区为 P 型半导体的称为 NPN 型三极管，基区为 N 型半导体的称为 PNP 型三极管，如图 11-7 所示。

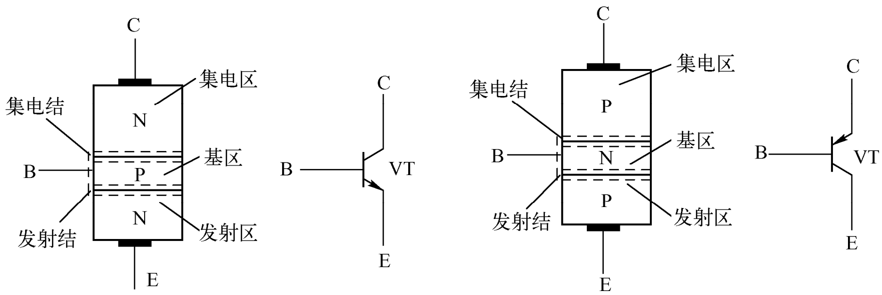


图 11-7　三极管结构示意图及图形符号

三极管的文字符号为 VT，图形符号如图 11-7 所示，两种符号的区别在于发射极的箭头方向不同。几种常见的三极管外形如图 11-8 所示。

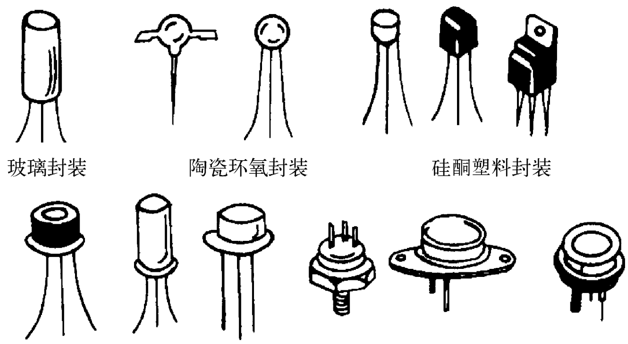


图 11-8　部分三极管外形

从图 11-7 上看，三极管好像是两个反向串联的 PN 结。但是如果把两个孤立的 PN 结，比如两个二极管反向串联起来，是不会有放大作用的。作为一个放大元器件，三极管在结构上必须具有下面三个特点：一是发射区掺杂浓度大于集电区掺杂浓度，集电区掺杂浓度远大于基区掺杂浓度；二是基区很薄，一般只有几微米；三是集电区的截面积大，使三极管的发射区与集电区不可互换。正是这三个特点，使三极管具有电流控制和放大作用。

2．类型

三极管按半导体材料可分为硅材料三极管和锗材料三极管；按电流容量可分为小功率三极管、中功率三极管和大功率三极管；按工作频率可分为低频三极管、高频三极管和超高频三极管等；按封装结构可分为金属封装（简称金封）三极管、塑料封装（简称塑封）三极管、玻璃壳封装（简称玻封）三极管、表面封装（片状）三极管和陶瓷封装三极管等。

11.3.2　三极管的电流放大作用

1．具有放大作用的条件

要使三极管具有电流放大作用，必须给三极管加上合适的工作电压，即：使发射结加正向电压，集电结加反向电压。也就是说，发射结的 P 区接电源负极，N 区接电源的正极。三极管放大电路不论采用哪种管型和哪种电路形式，都要满足这个基本条件。即对于 NPN 型三极管，C、B、E 三个电极的电位必须符合：$U_C>U_B>U_E$；对于 PNP 型三极管，电源的极性与 NPN 型相反，应符合 $U_C<U_B<U_E$。

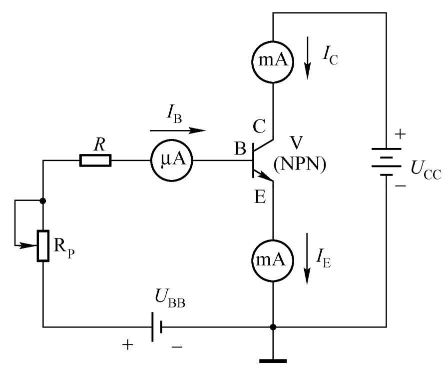


图 11-9　三极管电流测试电路

2．三极管内电流的分配

如图 11-9 所示为 NPN 型三极管共发射极电流测试电路（该电路以基极为输入端，集电极为输出端，发射极为输入、输出两个回路的共同端，因此叫共发射极电路，简称共射极电路）。电源 U_{BB} 使发射结正偏，U_{CC} 使集电结反偏。电位器 R_P 的作用是改变基极电流 I_B、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 的大小。表 11-1 列出了五组测量数据。

表 11-1　三极管电流测试数据（mA）

X	1	2	3	4	5
I_B	0	0.010	0.028	0.040	0.065
I_C	0.3	0.990	1.972	2.960	4.935
I_E	0.3	1	2	3	5

分析表中数据可知：发射极电流等于基极电流和集电极电流之和，即

$$I_E = I_B + I_C \tag{11-1}$$

由于

$$I_B \ll I_C$$

故

$$I_E \approx I_C \tag{11-2}$$

3．三极管的电流放大作用

从表 11-1 的实验数据可以看到，当基极电流 I_B 从 0.010mA 变化到 0.028mA 时，集电极电流 I_C 却由 0.990mA 变化到 1.972mA。这两个变化量之比为

$$\frac{1.972-0.990}{0.028-0.010}=\frac{0.982}{0.018}\approx 54$$

这就是说，集电极电流 I_C 的变化是基极电流 I_B 变化的 54 倍。可见 I_B 的微小变化，引起了 I_C 的较大变化。若用 Δ 表示基极电流的微小变化 ΔI_C 表示集电极电流的相应变化，β 表示这两个变化量的比值，那么

$$\beta=\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \tag{11-3}$$

显然，β 就是三极管的共发射极电路的电流放大系数。在表 11-1 中，当 $I_B=0$ 时，I_C 不等于零，这时的 I_C 值称为穿透电流，用 I_{CEO} 表示。所谓穿透电流就是当基极开路，在发射极与集电极之间加一电压时流过集电极的电流。穿透电流对温度很敏感，当温度升高时，它就显著增加。选择三极管时，一般希望 I_{CEO} 较小，β 选在 40～100 为宜。如有特殊需要可自行选择。

11.3.3　三极管的伏安特性曲线

图 11-10 为三极管特性测试电路。左边由基极和发射极组成的回路称为输入回路，右边由集电极和发射极组成的回路称为输出回路，输出信号由 R_C 取出。

三极管的特性曲线可根据实验数据绘出，也可以由晶体管图示仪直接绘出。三极管的伏安特性曲线分为输入特性曲线和输出特性曲线两种。下面以 NPN 型三极管（3DG130C）共发射极放大电路为例进行讨论。

1．输入特性曲线

输入特性曲线是指当三极管的集电极和发射极之间的电压 U_{CE} 保持一定时，加在基极和发射极之间的电压 U_{BE} 和基极电流 I_B 之间的关系曲线。

测量输入特性时，使得 $U_{CE}=0$，调节 R_b 测得相应的 U_{BE} 和 I_B，即可得到一条输入特性曲线 A，如图 11-11 所示。然后使得 $U_{CE}=1$V，重复上述步骤，可得到另一条输入特性曲线 B。当加在三极管上的 U_{CE} 电压大于 1V 时，测得的输入特性曲线和 $U_{CE}=1$V 时的那一条非常接近，因此三极管的输入特性曲线只需画出 $U_{CE}=1$V 时的那一条，即可从三极管的输入特性曲线看

出，加在发射结上的正偏电压只有大于死区电压时，三极管才出现基极电流。硅管的死区电压约为 0.5V，锗管的死区电压约为 0.2V，在正常情况下，硅管的 U_{BE} 约为 0.7V，锗管的 U_{BE} 约为 0.3V。

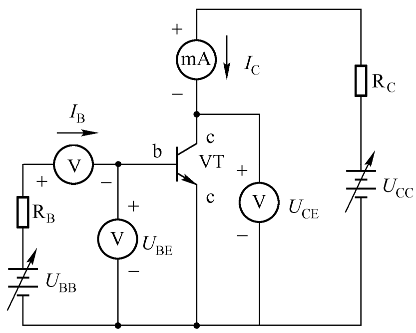


图 11-10　三极管特性测试电路

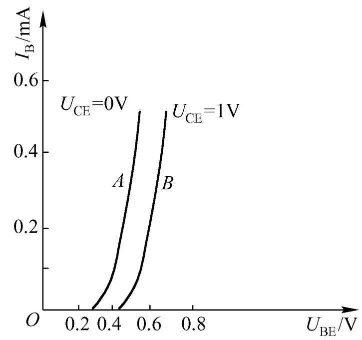


图 11-11　3DG130C 输入特性曲线

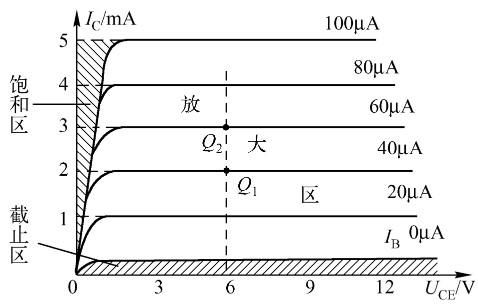


图 11-12　三极管输出特性曲线

2．输出特性曲线

三极管的输出特性曲线是指当基极电流 I_B 为常数时，三极管集电极电流与集电极和发射极之间的电压 U_{CE} 之间的关系曲线。仍用如图 11-10 所示的测试电路，取不同的 I_B，可得到不同的曲线，因此三极管的输出特性曲线是一个曲线族，如图 11-12 所示。由特性曲线可见，三极管可以工作在放大、截止和饱和三个不同的区域，即具有放大状态、截止状态和饱和状态三种不同的工作状态。

（1）截止区：$I_B=0$ 的特性曲线以下区域称为截止区。在这个区域中，集电结处于反偏，$U_{BE}\leq 0$，发射结反偏或零偏，即 $U_C>U_E\geq U_B$。电流 I_C 很小（等于反向穿透电流 I_{CEO}），工作在截止区时，三极管这时失去了电流放大作用，集电极和发射极之间相当于开关的断开状态，称为三极管处于截止状态。

（2）放大区：特性曲线近似水平直线的区域为放大区。在这个区域里发射结正偏，集电结反偏。这时基极电流 I_B 对集电极电流 I_C 起着控制作用，使三极管具有电流放大作用，其电流放大倍数 $\beta=\Delta I_C/\Delta I_B$，称为三极管处于放大状态。

（3）饱和区：饱和区是对应于 U_{CE} 较小的区域，包括曲线的上升和弯曲部分。此时 $U_{CE}<U_{BE}$，发射结、集电结均处于正偏，即使 I_B 增大，I_C 也不会增加，三极管呈饱和导通状态。这时三极管失去了电流放大作用，集电极和发射极之间相当于一个接通的开关。

11.3.4 三极管的主要参数

1．电流放大系数

电流放大系数也称电流放大倍数，用来表示晶体管的放大能力。根据晶体管工作状态的不同，电流放大系数又分为直流电流放大系数和交流电流放大系数。

（1）共发射极电路直流电流放大系数 h_{FE}。直流电流放大系数也称静态电流放大系数或直流放大倍数，是指在静态无变化信号输入时，晶体管集电极电流 I_C 与基极电流的比值，即 $h_{FE}=I_C/I_B$。

（2）交流电流放大系数 β。交流电流放大系数也称动态电流放大系数或交流放大倍数，是指在交流状态下，晶体管集电极电流变化量 ΔI_C 与基极电流变化量 ΔI_B 的比值，即 $\beta=\Delta I_C/\Delta I_B$。

h_{FE} 与 β 既有区别又关系密切，两个参数值在低频时较接近，在高频时有一些差异。为了方便，在以后共发射极电路中电流放大系数只用 β 作为常数。

2．集电极最大允许电流 I_{CM}

集电极最大允许电流是指三极管集电极所允许通过的最大电流。当三极管的集电极电流 I_C 超过 I_{CM} 时，三极管的 β 值等参数将发生明显变化，影响其正常工作，甚至还会损坏三极管。

3．最大反向电压

最大反向电压是指三极管在工作时所允许施加的最高工作电压。它包括集电极—发射极反向击穿电压、集电极—基极反向击穿电压和发射极—基极反向击穿电压。

（1）集电极—发射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$。

该电压是指当三极管基极开路时，其集电极与发射极之间的电压。

（2）集电极—基极反向击穿电压 U_{CBO}。

该电压是指当三极管发射极开路时，其集电极与基极之间能够承受的最大电压。

（3）发射极—基极反向击穿电压 U_{EBO}。

该电压是指当三极管的集电极开路时，其发射极与基极之间能够承受的最大电压。

4．极间反向电流

三极管的反向电流包括其集电极—基极之间的反向电流 I_{CBO} 和集电极—发射极之间的反向击穿电流 I_{CEO}。

（1）集电极—基极之间的反向电流 I_{CBO} 也称集电结反向漏电电流，是指当三极管的发射极开路时，集电极与基极之间的反向电流。I_{CBO} 对温度较敏感，该值越小，说明晶体管的温度特性越好。

（2）集电极—发射极之间的反向击穿电流 I_{CEO} 是指当三极管的基极开路时，其集电极与发射极之间的反向漏电电流，也称穿透电流。此电流值越小，说明三极管的性能越好。I_{CEO} 和 I_{CBO} 之间的关系为

$$I_{CEO}=(1+\beta)I_{CBO}$$

5．集电极最大允许耗散功率 P_{CM}

集电极最大允许耗散功率是指三极管参数变化不超过规定允许值时的最大集电极耗散功率。

集电极最大允许耗散功率与三极管的最高允许温度和集电极最大电流有密切关系。三极管在使用时，其实际功耗不允许超过 P_{CM} 值，否则会造成三极管因过载而损坏。P_{CM} 与 I_C 和 U_{CE} 的关系为

$$P_{CM}\geq I_C U_{CE}$$

三极管正常工作时，若 $I_C < I_{CM}$，$U_{CE} < U_{(BR)CEO}$，但 $I_C U_{CE} > P_{CM}$，三极管仍将损坏。

通常将集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 小于 1W 的三极管称为小功率三极管，集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 等于或大于 1W、小于 5W 的三极管被称为中功率三极管，将集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 等于或大于 5W 的三极管称为大功率三极管。

11.3.5　三极管的识别和简易检测方法

1．三极管的识别

目前三极管的种类较多，封装形式不一，引脚也有多种排列形式。常见的几种三极管引脚排列如图 11-13 所示。

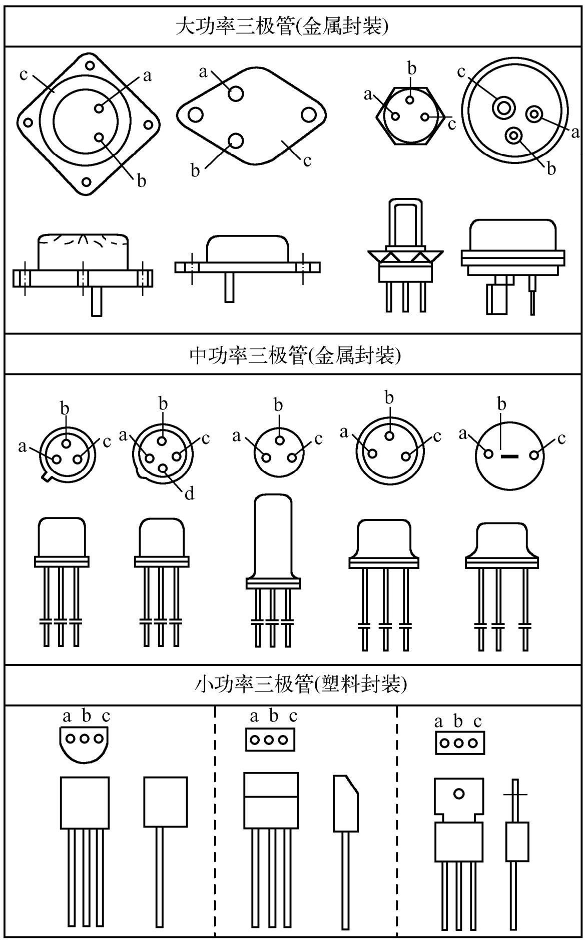


图 11-13　常见的几种三极管引脚排列

2．三极管的简易检测方法

1）三极管好坏的判断

在测量三极管时，不管是 NPN 管还是 PNP 管，不管是小功率、中功率还是大功率，通常把万用表置于 R×1kΩ 或 R×100 挡，测其 BE 结、BC 结都应呈现与二极管完全相同的单向导电性，反向电阻无穷大，其正向电阻大约在 10kΩ。然后进一步判断管型和管子质量的好坏。若在以上操作中无一电极满足上述现象，则说明三极管已损坏。

2）三极管基极和管型的判断

将万用表拨到 R×1kΩ 或 R×100 挡，黑表笔接三极管的任一电极，红表笔分别依次接另两个电极，在两次测量中若万用表指针均偏转很大，则黑表笔接的电极为基极，同时可判断该管为 NPN 型；反之，红表笔接三极管的任一电极，黑表笔分别依次接另两个电极，在两次测量中若万用表指针均偏转很大，则红表笔接的电极为基极，同时可判断该管为 PNP 型。

3）三极管集电极和发射极的判断

对于 NPN 型三极管，找到基极后，将红、黑表笔分别接在两个未知电极上，再用手指把基极和黑表笔所接的电极一起捏住，但两极不能相碰，记下此时万用表的读数，然后对换表笔，用同样的方法再测一次阻值。比较两次结果，读数较小的一次黑表笔所接的引脚为集电极。

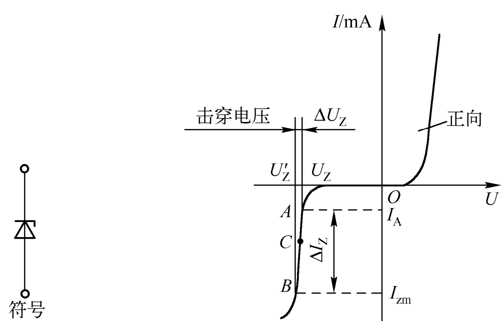
对于 PNP 型三极管，只要调换一下红、黑表笔的位置，仍按上述方法测试，读数较小的一次红表笔所接引脚为集电极。

11.4 其他半导体器件

11.4.1 稳压二极管

稳压二极管又叫稳压管，它是用特殊工艺制造的面接触型硅半导体二极管，它既具有普通二极管的单向导电特性，又可工作于反向击穿状态。在反向电压较低时，稳压二极管截止；当反向电压达到一定数值时，反向电流突然增大，稳压二极管进入击穿区，此时即使反向电流在很大范围内变化时，稳压二极管两端的反向电压也能保持基本不变，实现稳压。其被反向击穿后，当外加电压减小或消失时，PN 结能自动恢复而不至于损坏。但若反向电流增大到一定数值后，稳压二极管则会被彻底击穿而损坏。稳压管主要用于电路的稳压环节和直流电源电路中，常用的有 2CW 型和 2DW 型。

稳压管的图形符号如图 11-14（a）所示，文字符号为 V。其伏安特性曲线如图 11.14（b）所示。由伏安特性曲线可知，稳压管的伏安特性曲线与普通二极管相类似，其差异是稳压管的反向特性曲线比较陡。



（a）图形符号　　（b）特性曲线

图 11-14　稳压二极管的特性曲线和符号

11.4.2 发光二极管

发光二极管是一种将电能直接转换成光能的光发射器件，简称 LED，它是由镓、砷、磷等元素的化合物制成的。这些材料构成的 PN 结加上正向电压时，就会发出光来，光的颜色取决于制造所用的材料。

发光二极管通常用透明的塑料封装，引脚长的为正极，引脚短的为负极。有的发光二极管有三个引出脚，根据引脚电压情况能发出两种颜色的光。发光二极管的符号和外形如图 11-15 所示。发光二极管的驱动电压低、工作电流小，具有很强的抗振动和冲击能力、体积小、可靠性高、耗电省和寿命长等优点，广泛用于信号指示等电路中。

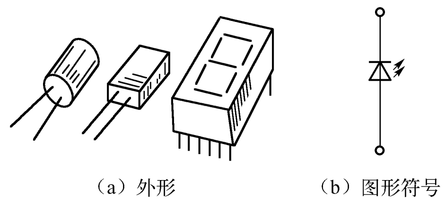


图 11-15　发光二极管的外形与图形符号

11.4.3　光电二极管

光电二极管又称光敏二极管。它的管壳上备有一个玻璃窗口，以便于接受光照。其特点是，当光线照射于它的 PN 结时，可以成对地产生自由电子和空穴，使半导体中少数载流子的浓度提高。这些载流子在一定的反向偏置电压作用下可以产生漂移电流，使反向电流增加，因此它的反向电流随光照强度的增加而线性增加，这时光电二极管等效于一个恒流源。当无光照时，光电二极管的伏安特性与普通二极管一样，其图形符号如图 11-16 所示。

光电二极管被广泛应用于光电技术中，将光信号转换为电信号。例如，在光缆通信中，通过接收端的光电二极管将光信号转换为电信号，在数控机床中作为光电控制器件或用来进行光的测量。大面积的光电二极管可作为一种绿色能源，称为光电池，可进行太阳能发电、高速公路沿途标志牌的电源等。



图 11-16　光电二极管符号

11.4.4　变容二极管

变容二极管是利用 PN 结之间电容可变的原理制成的半导体器件，属于反偏压二极管，改变其 PN 结上的反向偏压，即可改变 PN 结的电容量。反向偏压越高，结电容则越少，

反向偏压与结电容之间的关系是非线性的。其特性曲线及图形符号如图 11-17 所示。

变容二极管有玻璃外壳封装（玻封）、塑料封装（塑封）、金属外壳封装（金封）和无引线表面封装等多种封装形式。通常，中小功率的变容二极管采用玻封、塑封或表面封装，而功率较大的变容二极管大多采用金封。

变容二极管在高频调谐、通信等电路中作为可变电容器使用。主要用在手机或座机的高频调制电路上，将低频信号调制到高频信号上，并发射出去。

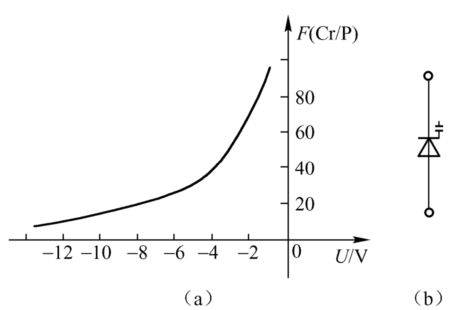


图 11-17　变容二极管的特性曲线及图形符号

11.4.5　开关二极管

开关二极管与普通二极管的导电特性相同，即加正向偏置电压导通，正向电阻很小；加反向偏置电压截止，反向电阻很大。开关二极管除能满足普通二极管的性能指标要求外，还具有良好的高频开关特性（反向恢复时间较短），被广泛应用在脉冲电路和自动控制电路中。

开关二极管分为普通开关二极管、高速开关二极管、超高速开关二极管、低功耗开关二极管、高反压开关二极管、硅电压开关二极管等。

11.4.6 晶闸管*

晶闸管具有硅整流器件的特性，能在高电压、大电流条件下工作，且其工作过程可以控制，被广泛应用于可控整流、交流调压、无触点电子开关、逆变及变频等电子电路中。

1．晶闸管的结构和符号

晶闸管是晶体闸流管的简称，又可称为可控硅整流器，以前被简称为可控硅。常见的晶闸管有小型塑封型、螺栓型和平板型，如图 11-18 所示。它是由四层半导体材料组成的，有三个 PN 结，对外有三个电极，第一层 P 型半导体引出的电极称为阳极 A，第三层 P 型半导体引出的电极称为门极 G，第四层 N 型半导体引出的电极称为阴极 K。如图 11-19 所示是晶闸管的结构和图形符号，文字符号为“ VT ”。



图 11-18 常见的晶闸管外形

2．晶闸管的工作原理

1）门极不加正向电压

当晶闸管阳极加上正向电压（即阳极 A 接电源的正极，阴极 K 接电源的负极），门极不加电压时，晶闸管处于关断状态，此时称为正向阻断；当晶闸管阳极加上反向电压（即阳极接电源的负极，阴极接电源的正极），门极不加电压时，晶闸管也处于关断状态，此时称为反向阻断。即只要晶闸管的门极不加电压，不管晶闸管的阳极是加正向电压还是反向电压，晶闸管都处于关断状态。

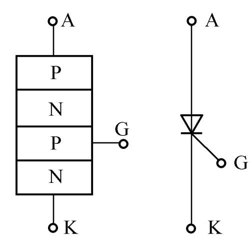


图 11-19 晶闸管的结构和图形符号

2）门极加正向电压

当晶闸管阳极加上正向电压，门极也加正向电压（即门极 G 接电源的正极，阴极 K 接电源的负极）时，晶闸管完全导通。晶闸管一旦导通，降低或者去掉门极 G 与阴极 K 之间输入的正向电压，晶闸管仍然导通，即门极已失去控制。要使导通后的晶闸管重新关断，应设法减小阳极电流，使其小于晶闸管的导通维持电流。

综上所述，晶闸管具有如下特点：

（1）晶闸管具有正向和反向阻断能力。要使晶闸管导通，必须阳极加正向电压，同时门极也必须加正向电压。

（2）晶闸管一旦导通，门极即失去控制作用。要使晶闸管关断，可使用两种办法：一是将阳极电流减小到小于其维持电流，二是将阳极电压减小到零或使之反向。

3．晶闸管的主要参数

1）通态平均电流

在规定的环境温度和散热条件下，允许通过的工频正弦半波电流在一个周期内的最大平均

值称为通态平均电流，简称正向电流。

2）通态平均电压

晶闸管正向通过正弦半波额定的平均电流、结温稳定时的阳极和阴极间的电压平均值称为通态平均电压，习惯上称为正向平均管压降，一般为 0.4～1.2V。

3）维持电流

在规定的环境温度和门极断路的情况下，维持晶闸管继续导通时需要的最小阳极正向电流称为维持电流。

4）门极触发电压和电流

在规定的环境温度和一定的正向电压下，为使其导通而要求门极所加的最小电压和电流。

4．晶闸管的简单检测

根据 PN 结的原理，只要用万用表欧姆挡（R×100 挡或 R×1k 挡）测量晶闸管 3 个极之间的电阻值，就可以判别晶闸管的 3 个电极。

由晶闸管的结构可知：晶闸管的门极 G 与阴极 K 之间是一个 PN 结，它相当于一个二极管，G 为正极、K 为负极，所以，按照测试二极管的方法，找出 3 个极中的两个极，测它的正、反向电阻，电阻小时，万用表黑表笔接的是门极 G，红表笔接的是阴极 K，剩下的一个极就是阳极 A。

11.5　技能训练 14　二极管、三极管和晶闸管的识别与检测

11.5.1　技能训练目标

（1）了解二极管、三极管和晶闸管的外形。

（2）掌握二极管、三极管和晶闸管引脚判别的常用方法。

（3）掌握万用表测晶体二极管、三极管和晶闸管的原理及其测试方法。

11.5.2　技能训练仪器与器件

（1）万用表一块。

（2）各型号二极管 4 只；各型号三极管 4 只；各型号晶闸管 4 只；电阻 1 只。

11.5.3　技能训练内容与步骤

1．二极管的测试

1）二极管极性的判别

将万用表置于 R×100（R×1k）挡，两表笔随意接二极管的两引脚，若测出电阻在几百至几千欧之间，则黑表笔所接引脚为正极，红表笔所接引脚为负极；将表笔互换再测试一次，此时阻值应趋于无穷大。

2）二极管种类和质量好坏的判别

（1）在上述测量中，正向电阻较大（400Ω左右）反向电阻很大（看不出表针摆动）的是硅二极管，而且质量良好；正向电阻过大而反向电阻又较小（能看出表针摆动）的，是劣质硅二极管。

（2）在上述测量中，正向电阻较小（200Ω左右）反向电阻较大（表针略有摆动）的是锗二

极管，而且质量良好；正向电阻过大而反向电阻又很小（表针摆动幅度大于满偏的 1/5）的，是劣质锗二极管。

（3）在上述测量中，如果正、反向电阻均为零（短路）或均为无穷大（断路），则被测管是坏的。

（4）按表 11-2 的要求，将测量的结果记入表中。

表 11-2　二极管的种类及质量测试

被测管编号	正向电阻（Ω）	反向电阻（Ω）	种　类	质　量
1				
2				
3				
4				

2．三极管的测试

1）三极管的电极和种类的判断

（1）基极和种类的判断。

① 万用表置于 R×100（或 R×1k）挡，将黑表笔接在任一电极上，红表笔分别接触另外两个电极，若测得的电阻值都很小，则黑表笔所接的引脚就是基极，被测管为 NPN 管。

② 如果黑表笔依次接三个引脚后均无上述现象，则可把红表笔接在被测管的某一电极上，黑表笔分别接触其他两个电极，若测得的阻值都较小，则红表笔所接引脚是基极，且被测管为 PNP 管。

③ 三极管的种类可根据 PN 结正向阻值的大小来判断。PN 结正向电阻较大（400Ω左右）的是硅管；PN 结正向电阻较小（200Ω左右）的是锗管。

（2）集电极和发射极的判断。

在确定基极后，方能对集电极和发射极进行判断。

① 对于 NPN 管：首先假定一个极为集电极，则另外一个极为发射极。将黑表笔接假定的“集电极”，红表笔接假定的“发射极”，用一只 100kΩ左右的固定电阻搭接在基极和假定的“集电极”之间，记下此时的阻值；调换表笔再测一次，也记下这时的阻值。对比两次测得的阻值，哪次阻值较小，哪次黑表笔接的就是集电极，则另外一极就是发射极。

② 对于 PNP 管：只需调换表笔的接法，测试原理与 NPN 型管完全相同。读者可根据上述方法，自行分析并进行判断。

2）三极管放大能力的判断

在判断三极管的集电极的同时也可以粗略测试三极管的放大能力。对比几只被测过的三极管，在判断集电极时，表针摆动较大的，β 值较大；表针摆动较小的，β 值较小。

3）三极管质量的判断

（1）三极管穿透电流的测定。可使用万用表的 R×100 挡，按如下方法测量。

① NPN 管：将黑表笔接集电极，红表笔接发射极，看表针的摆动情况。对硅管来说，表针应不摆动，如略有摆动，则为次品；对锗管来说，表针可有摆动，但摆动的幅度不超过满刻度的 1/10，如超过则为次品。

② PNP 管：只需将表笔对调进行测试，质量判断与 NPN 型管完全相同。

（2）三极管损坏的判断。当三极管的某个 PN 结损坏或三极管无放大能力时，可确定为损坏。

按表 11-3 的要求将测量数据及结果填入表中。在测量放大能力和穿透电流时，可按满偏的十分之几记录。b-c 极间阻值和 b-e 极间阻值的测量，一律记录正向电阻。

表 11-3　三极管的种类及质量测试

被测管编号	b-c 极间阻值（Ω）	b-e 极间阻值（Ω）	种类	放大能力	穿透电流	质量
1						
2						
3						
4						

3．晶闸管的测试

1）晶闸管的引脚电极判断

（1）按封装形式判断各电极。例如：螺栓型普通晶闸管的螺栓一端为阳极 A，较细的引线端为门极 G，较粗的引线端为阴极 K。平板型普通晶闸管的引出线端为门极 G，平面端为阳极 A，另一端为阴极 K。

（2）对小电流的塑封管可按此方法判别：将万用表置于 R×1k 挡，测量晶闸管任意两脚间的电阻，当万用表指示低阻值时，黑表笔所接为控制极 G，红表笔所接为阴极 K，另外一极为阳极 A。其他情况下所测电阻均为无穷大。

2）鉴别晶闸管的好坏

用万用表 R×1k 挡测量阳极 A 与阴极 K 之间的正、反向电阻，正常时均应为无穷大（∞），若测得 A、K 之间的正、反向电阻值为零或阻值较小，则说明晶闸管内部击穿短路或漏电。

测量门极 G 与阴极 K 之间的正、反向电阻值，正常时应有类似二极管的正、反向电阻值（实际测量结果较普通二极管的正、反向电阻值小一些），即正向电阻值较小（小于 2 kΩ），反向电阻值较大（大于 80kΩ）。若两次测量的电阻值均很大或均很小，则说明该晶闸管 G、K 极之间开路或短路。若正、反电阻值均相等或接近，则说明该晶闸管已失效，其 G、K 极间 PN 结已失去单向导电作用。

测量阳极 A 与门极 G 之间的正、反向电阻，正常时两个阻值均应为几百千欧姆（kΩ）或无穷大，若出现正、反向电阻值不一样（有类似二极管的单向导电），则是 G、A 极之间反向串联的两个 PN 结中的一个已击穿短路。

将所测得的电阻值填入表 11-4 中，并根据上述方法判断晶闸管的好坏。

表 11-4　晶闸管的测量阻值及质量测试

被测管编号 / 测量值	1	2	3	4
R_{AK}				
R_{KA}				
R_{AG}				
R_{GA}				
R_{GK}				
R_{KG}				
质量好坏				

11.5.4 注意事项

（1）测量时应该注意极性（施加到管脚的电压极性）。

（2）正确选择万用表的挡位，以便得出正确的结论。

（3）根据测量的结果判断器件的优劣程度。

11.5.5 创新能力的启发和培养

怎样测量二极管和三极管的伏安特性和输入、输出特性？

提示：二极管的伏安特性曲线可采用调节其两端电压测量流过的电流，逐点描得；三极管的输入特性也可仿照二极管伏安特性曲线测绘的方法进行，而输出特性必须确定一个输入电流 I_b，再调节输出端电压 U_{ce}，逐点测取 I_c 值。

11.5.6 思考问题

（1）二极管测量时为何正向电阻小的为锗管，而正向电阻大的为硅管？

（2）三极管的引脚测定时，为什么要先确定基极？

（3）晶闸管的测试应注意哪些问题？

11.5.7 实训要求

（1）测量记录各种管子的数据，并分析其有无误差。

（2）回答思考问题。

（3）总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 11

1. 半导体中有哪两种导电粒子？什么是 P 型半导体？什么是 N 型半导体？
2. 简述 PN 结的单向导电性。
3. 怎样用万用表判别硅二极管和锗二极管？怎样用万用表判断小功率二极管的好坏与极性？
4. 晶体二极管的主要参数有哪些？某二极管的最高反向工作电压为 20V，能否把它接在电压为 20V 的正弦交流电路中？为什么？
5. 三极管处于放大状态的内部条件和外部条件是什么？
6. 二极管是由一个 PN 结构成的，而三极管是由两个 PN 结构成的，那么用两个二极管串联起来能否代替一只三极管使用？为什么？
7. 三极管有哪三种工作状态？工作在每种状态的条件是什么？三种状态各有哪些主要特点？
8. 发光二极管和光电二极管各有什么作用？
9. 何谓变容二极管？变容二极管正常工作时的 PN 结是正偏还是反偏？
10. 画出晶闸管的图形符号，标出它的三个电极。
11. 如何判断晶闸管的三个电极？

教学微视频

扫一扫

第 12 章　整流、滤波及稳压电路

【本章学习目标】

1. 了解整流、滤波、稳压的概念。
2. 掌握单相桥式整流电路的结构并解释其工作原理。
3. 能区分不同滤波电路的作用。
4. 知道稳压二极管的作用。
5. 掌握简单串联型稳压电源的组成及工作原理。
6. 能识别常用三端固定式集成稳压器的引脚排列，并能安装应用电路。

【教学目标】

1. 知识目标：了解整流、滤波的概念；掌握单相桥式整流电路的结构和工作原理。
2. 能力目标：通过理论知识的学习和应用，培养综合运用能力。

【教学重点】

整流、滤波的概念及单相桥式整流电路的工作原理。

【教学难点】

电容滤波的概念。

【教学方法】

读书指导法、分析法、演示法、练习法。

电子与电气设备中所需要的直流电源，通常都是由电网所提供的交流电经过变压、整流、滤波和稳压以后得到的。

将交流电转变为直流电的过程叫整流。将交流电转化为直流电的设备叫整流器。整流器是由电源变压器、整流电路、滤波电路和稳压电路 4 个部分组成的。组成电路及其输出波形如图 12-1 所示，各部分电路作用如下。

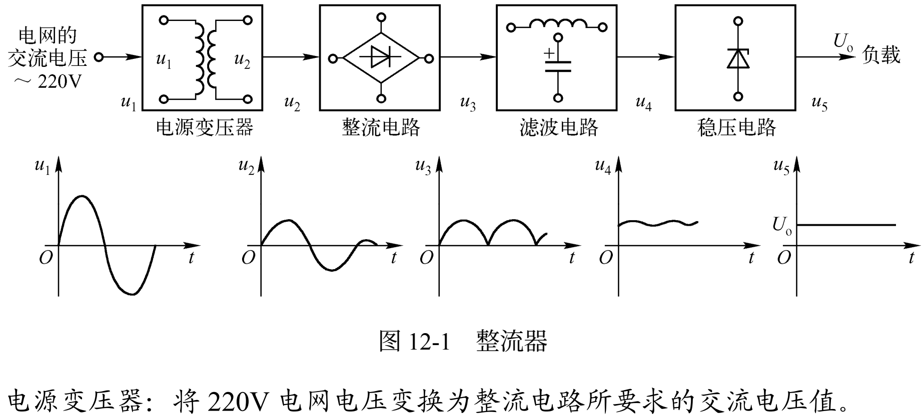


图 12-1　整流器

（1）电源变压器：将 220V 电网电压变换为整流电路所要求的交流电压值。

（2）整流电路：将交流电压变换为脉动直流电压。

（3）滤波电路：将脉动的直流电变换为平滑的直流电。

（4）稳压电路：使直流电源的输出电压稳定，基本不受电网电压或负载变动的影响。

本章主要介绍单相整流电路和简单的稳压电路，以及它们在电气设备中的应用。

12.1 整流电路

在如图 12-2 所示的电路中，假设在一个周期内，能在 $t=0$ 时刻，迅速接通开关 S，让电源电压正半周加到负载上；而当 $t=T/2$ 时刻，迅速关断开关 S，截断回路中的负半周电源；到下个周期到来时，重复上面的步骤。那么从原理上讲，在负载上就可以获得切除了负半周且方向单一的脉冲直流电了。由此可联想到晶体二极管的单向导电特性，正是一种理想的单向电子开关。用二极管 VD 代替图 12-2 中的开关 S，就构成了最简单的整流电路。

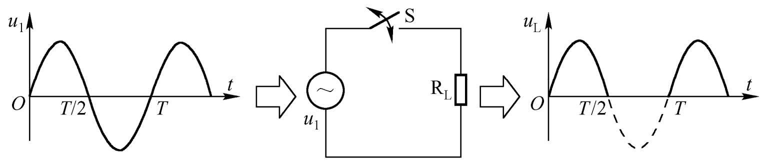


图 12-2　开关的变化获得脉冲电压波形

为了讨论方便，在以下分析中，除了特别说明外，一般均假定负载为纯电阻，二极管、变压器等均为理想器件。

12.1.1 单相半波整流电路

单相整流电路就是利用二极管的单向导电特性，把交流电变换成方向不变，大小随时间变化的脉动直流电的电路。

1．电路组成

如图 12-3 所示为单相半波整流电路，它由变压器 T 和整流二极管 VD 组成。其中，变压器 T 的作用是将电源电压 u_1 变换成适当的电压 u_2 供整流用，它的瞬时表达式为 $u_2=\sqrt{2}U_2\sin\omega t$，波形如图 12-3（b）所示。二极管是整流元器件。

2．工作原理

设在输入电压 u_2 正半周（0～π）：A 端为正，B 端为负，二极管 VD 在正向电压的作用下导通，若忽略二极管导通时的管压降，则负载 R_L 两端的电压 u_L 就等于 u_2，R_L 上电流方向与电压极性如图 12-3（a）所示。

在 u_2 的负半周（π～2π）：变压器次级 A 端为负，B 端为正，则二极管承受反向电压而截止，u_2 几乎全部降落在二极管 VD 上，负载两端的电压 u_L 为零。

随着 u_2 周而复始的变化，负载 R_L 上就得到如图 12-3（c）和图 12-3（d）所示的电流和电压波形。这种整流电路只利用电源电压 u_2 的半个周期，所以称为半波整流。负载中的电压方向不变，但大小与输入电压相比较，有了本质的改变，即变成了大小随时间变化，但方向不变的脉冲直流电。

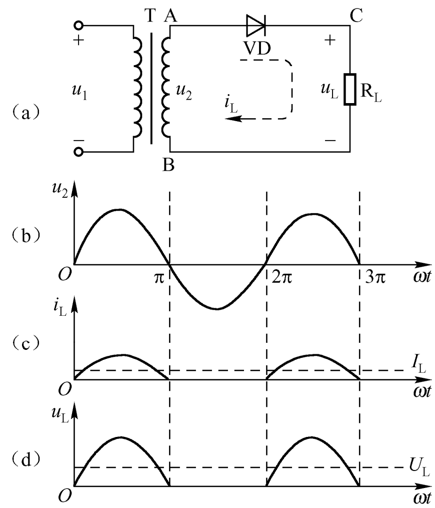


图 12-3　单相半波整流电路

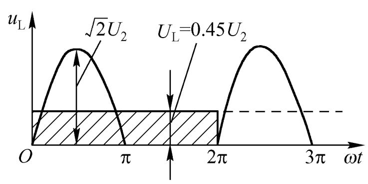


图 12-4　单相半波整流输出平均值

3．负载电压和电流

经半波整流后，在负载 R_L 上得到了单向脉冲直流电压。图 12-4 表示了计算平均值的方法：使半个正弦波与横轴所包围的面积等于一个矩形的面积，该矩形的宽度等于一个周期，那么矩形的高度就是这个半波的平均值。

经计算可得负载两端的直流电压为

$$U_L=\frac{\sqrt{2}U_2}{\pi}=0.45U_2 \qquad (12\text{-}1)$$

式中　U_L——负载两端的直流电压；

U_2——变压器二次交流电压的有效值。

根据欧姆定律，可得负载的直流电流为

$$I_L=0.45\frac{U_2}{R_L} \qquad (12\text{-}2)$$

4．整流二极管的选择

流过整流二极管的平均电流 I_F 与流过负载的直流电流 I_L 相等，即

$$I_F=I_L=0.45\frac{U_2}{R_L} \qquad (12\text{-}3)$$

当二极管截止时，它所承受的最大反向电压 U_{RM} 就是 u_2 峰值，即

$$U_{RM}=\sqrt{2}U_2 \qquad (12\text{-}4)$$

根据计算得到的 I_F 和 U_{RM} 选择整流二极管，考虑到电网电压的波动和其他因素，二极管的参数可适当选大些。

【例 12-1】某一直流负载，电阻为 1.5kΩ，要求工作电流为 10mA，如果用半波整流电路，试求整流变压器次级的电压值，并选择适当的整流二极管。

已知：R_L＝1.5kΩ，I_L＝10mA。

求：U_2、I_F 和 U_{RM}。

【解】　因为 $U_L = R_L \times I_L$

$$= 1.5\times10^3\times10\times10^{-3} = 15\text{（V）}$$

所以 $U_2 = \frac{U_L}{0.45} = \frac{15}{0.45} \approx 33\text{（V）}$

流过二极管的平均电流为

$$I_F = I_L = 10\text{（mA）}$$

二极管承受的最大反向电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 = 1.41\times33 \approx 47\text{（V）}$$

根据以上参数，查晶体管手册，可选用一个额定整流为 100mA、最高反向工作电压为 50V 的 2CZ82B 型整流二极管。

5．单相半波整流特点

半波整流电路线路简单，使用元器件少，但电源的利用率低，输出的直流电压低，脉冲大。一般只用于小电流及输出电压和整流效率要求不高的场合。

12.1.2　单相桥式整流电路

1．电路组成

如图 12-5 所示为单相桥式整流电路的常见三种画法。它由变压器和 4 个整流管组成，其电路接成电桥的形式，故称为桥式整流电路。变压器次级电压 u_2 的波形如图 12-7（a）所示。

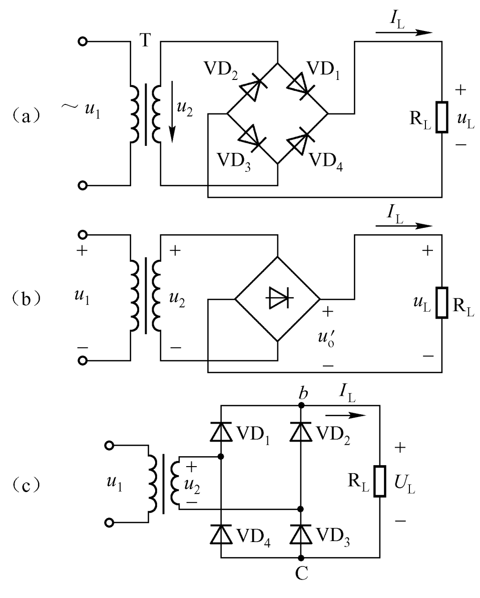


图 12-5　单相桥式整流电路

2．工作原理

下面以图 12-5（a）为例来说明单相桥式整流电路的整流原理。

设在输入电压 u_2 正半周（$0\sim t_1$）：A 端为正，B 端为负，即 A 点电位高于 B 点电位。二极管 VD_1、VD_3 正偏导通，二极管 VD_2、VD_4 反偏截止，电流 I_{L1} 通路是 A→VD_1→R_L→VD_3→B，如图 12-6（a）所示。这时，负载 R_L 上得到一个半波电压，如图 12-7（b）中（$0\sim t_1$）所示。

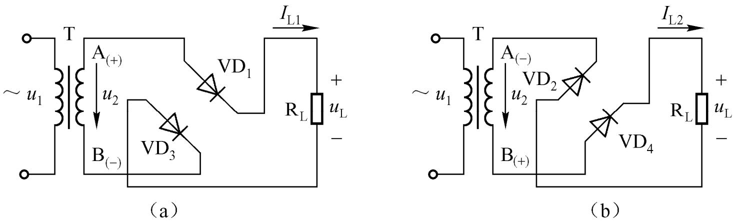


图 12-6　单相桥式整流电流通路

输入电压 u_2 负半周（t_1～t_2）：A 端为负，B 端为正，即 B 点电位高于 A 点电位。二极管 VD_2、VD_4 正偏导通，二极管 VD_1、VD_3 反偏截止，电流 I_{L2} 通路是 B→VD_4→R_L→VD_2→A，如图 12-6（b）所示。同样，负载 R_L 上得到一个半波电压，如图 12-7（b）中（t_1～t_2）所示。

由此可见，在 u_2 的正、负半周，都有同一方向的电流电流过 R_L，4 个二极管中两个为一组，两组轮流导通，在负载上即可得到全波脉冲的直流电压和电流，如图 12-7（b）和图 12-7（c）所示。所以这种整流电路属于全波整流类型，也称为单相桥式全波整流电路。

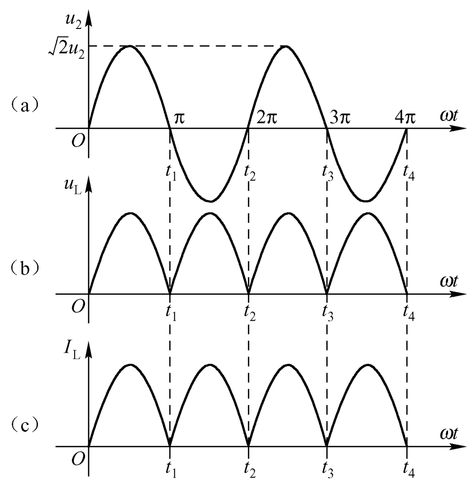


图 12-7　单相桥式整流波形图

3．负载电压和电流

经计算可得：

负载两端的直流电压为

$$U_L=0.9U_2 \tag{12-5}$$

流过负载的平均电流为

$$I_L=\frac{U_L}{R_L}=0.9\frac{U_2}{R_L} \tag{12-6}$$

4．整流二极管的选择

在桥式整流电路中，因为二极管 VD_1、VD_3 和 VD_2、VD_4 是轮流导通的，所以流过每个二极管的电流等于负载电流的一半，即

$$I_F=\frac{1}{2}I_L=0.45\frac{U_2}{R_L} \tag{12-7}$$

由图 12-6（a）可知，当 VD_1 和 VD_3 导通时，变压器次级电压的正极加到 VD_2、VD_4 的负极，而次级电压的负极却加到 VD_2、VD_4 的正极，由于二极管的正向电压降很小，可以忽略不计，所以 VD_2、VD_4 受到的最大反向电压就是变压器次级电压 u_2 的最大值，即

$$U_{RM}=\sqrt{2}U_2 \tag{12-8}$$

考虑到电网电压的波动，在实际选用整流二极管时，应至少有 10%的余量。

【例 12-2】一桥式整流电路，要求它输出 12V 直流电压和 100mA 电流，现有二极管 2CP10（I_F＝100mA，U_{RM}＝25V）和 2CP11（I_F＝100mA，U_{RM}＝50V），应选用哪种型号？

已知：$U_L=12V$，$I_L=100mA$。

求：I_F 和 U_{RM}。

【解】　$I_F=\frac{1}{2}I_L=0.5\times100=50$（mA）

$U_2=\frac{U_L}{0.9}=\frac{12}{0.9}=13.33V$

$U_{RM}=\sqrt{2}U_2=1.414\times13.33=18.85$（V）

可选用四个 2CP10 二极管。

5．单相桥式整流特点

输出电压脉冲小，整流效率高，而且变压器次级没有中心抽头，绕组减少一半，每个整流二极管承受的反向电压降低一半，由于每半周内变压器次级绕组都有电流流过，变压器利用效率高。

正因为桥式整流电路具有上述优点，所以在仪器仪表、通信、控制装置等设备中应用最为广泛。

12.2 滤波电路

由于交流电经整流后得到的是脉冲直流电，输出电压不够平稳，所以在一些要求电流和电压都比较平稳的负载如电子仪器、自动控制设备中还不能直接使用它，还需要把脉冲直流电中的交流成分滤除，这就叫滤波，这样的电路就称为滤波电路，它通常是由电容、电感、电阻按一定方式组成的，如图 12-8 所示。

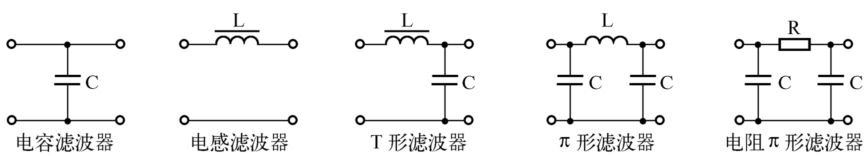


图 12-8　滤波电路的几种形式

12.2.1 电容滤波电路

如图 12-9 所示是单相桥式整流电容滤波电路，电容器 C 并联在负载两端。根据电工基础知识可以知道，电容器在电路中有储存和释放能量的作用：电流供给的电压升高时，它把部分能量储存起来；而当电源电压降低时，就把能量释放出来，从而减少脉冲成分，使负载电压比较平滑，即电容器具有滤波的作用。在分析电容滤波电路时，要特别注意电容两端电压对整流器件导电的影响。整流器件只有受正向电压作用时才导通，否则截止。

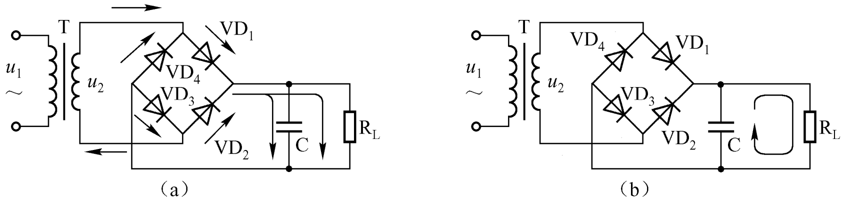


图 12-9　单相桥式整流电容滤波电路

1．工作原理

单相桥式整流电路在不接电容器 C 时，其输出电压波形如图 12-10（a）所示，这一点，在前面我们已经讨论过了。那么接上电容器 C 后，情况又会怎样呢？

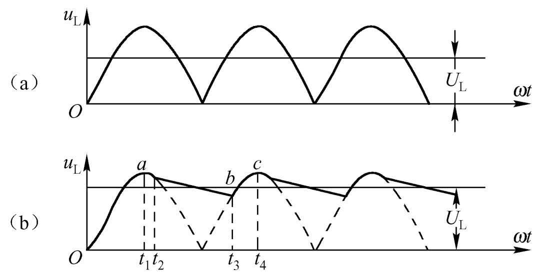


图 12-10　单相桥式整流电容滤波波形图

u_2 为正半周：二极管 VD_1、VD_3 在正向电压作用下导通，VD_2、VD_4 反偏截止，如图 12-9（a）所示。整流电流分为两路，一路经二极管 VD_1、VD_3 向负载 R_L 提供电流，另一路向电容器 C 充电，如图 12-10（b）中 Oa 段所示。到 t_1 时刻，电容器上电压 u_c 接近交流电压 u_2 的最大值也 $\sqrt{2}U_2$，极性上正下负。经过 t_1 时刻后，u_2 按正弦规律迅速下降，直到 t_2 时刻，此时 $u_2 < u_c$，二极管 VD_1、VD_3 受反向电压作用也截止。电容器 C 经 R_L 放电，放电回路如图 12-9（b）所示。如果放电速度缓慢，则不能迅速下降，如图 12-10（b）中 ab 段所示。与此同时，u_2 继续按正弦规律变化。

u_2 为负半周：没有电容器 C 时，二极管 VD_2、VD_4 应该在 t_3 时刻导通，但由于此时 $u_c > u_2$，迫使 VD_2、VD_4 处于反偏截止状态，直到 t_4 时刻 $u_2 > u_c$ 时，VD_2、VD_4 才导通，整流电流向电容器 C 再度充电到最大值 $\sqrt{2}U_2$，如图 12-10（b）中 bc 段所示。

然后 u_2 又按正弦规律下降，当 $u_2 < u_c$ 时，二极管 VD_2、VD_4 反偏截止，电容器又经 R_L 放电。电容器 C 如此周而复始进行放电，负载上便得到近似如图 12-10（b）所示的锯齿波电压。

电容滤波在全波整流电路的工作原理与在桥式整流电路时一样，电源电压在一个周期内，电容器 C 充、放电各两次。比较图 12-10（a）和图 12-10（b）可见，经电容器滤波后，输出电压平滑了，交流成分大大减少，而且输出电压平均值得到提高，这就是滤波的作用。

半波整流电容滤波的输出电压波形，其特点是电源电压在一个周期内，电容器 C 充、放电只有一次，输出电压平均值也得到了一定的提高，如图 12-11 所示。

2．电容滤波的特点

R_LC 越大，电容 C 放电越慢，输出的直流电压就越大，滤波效果也越好；反之，则输出电压低且滤波效果差，如图 12-12 所示。

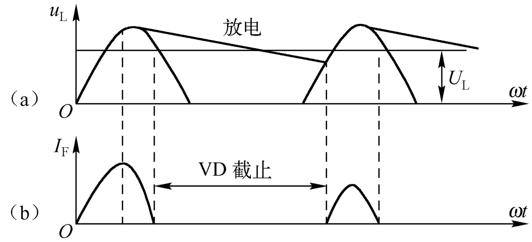


图 12-11　单相半波整流电容滤波波形图

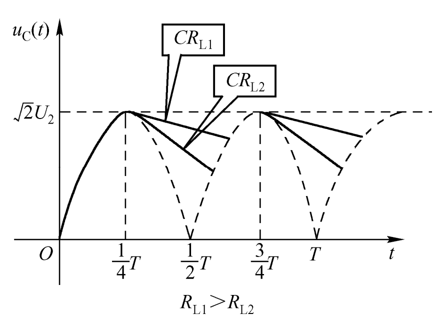


图 12-12　单相半波整流电容滤波波形图

当滤波电容较大时，在接通电源瞬间会有很大的充电电流，称浪涌电流。

电容滤波适用于负载电流较小且变化不大的场合。

3．电压和电流的估算

各种整流电路经电容滤波后，有关电压和电流的估算值可参考表 12-1。

表 12-1　电容滤波的整流电路电压和电流的估算

整流电路形式	输入交流电压（有效值）	整流电路输出电压		整流器件上电压和电流	
		负载开路时的电压	带负载时的电压 U_L（估计值）	最大反向电压 U_{RM}	流过的电流
半波整流	U_2	$\sqrt{2}U_2$	U_2	$2\sqrt{2}U_2$	I_L
全波整流	U_2	$\sqrt{2}U_2$	$1.2U_2$	$2\sqrt{2}U_2$	$\frac{1}{2}I_L$
桥式整流	U_2	$\sqrt{2}U_2$	$1.2U_2$	$2\sqrt{2}U_2$	$\frac{1}{2}I_L$

4．滤波电容的选取

选择滤波电容一般应满足 $R_LC \geq$（3～5）T（T 为脉冲电压的周期）；或按照表 12-2，根据负载电流的大小来选择。

表 12-2　滤波电容的选取

负载电流 I_L/A	2	1	0.5～1	0.1～0.5	0.1 以下	0.05 以下
滤波电容 C/μF	4000	2000	1000	500	200～500	200

注：此为单相桥式整流电容滤波电路 U_L＝12～36V 时的参考值。

【例 12-3】在桥式整流电容滤波电路中，若负载电阻 R_L 为 240Ω，输出直流电压为 24V，试确定电源变压器次级电压，并选择整流二极管和滤波电容。

【解】（1）求电源变压器次级电压 U_2。

根据表 12-1，有 $U_L \approx 1.2\,U_2$

所以 $U_2 = \frac{U_L}{1.2} = \frac{24}{1.2} = 20$（V）

（2）整流二极管的选择。

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{24}{240} = 0.1\text{（A）}$$

通过每个二极管的直流电流

$$I_F = \frac{1}{2}I_L = \frac{1}{2} \times 0.1 = 50\text{（mA）}$$

每个二极管承受的最大反向电压

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 \approx 1.414 \times 20 \approx 28\text{（V）}$$

查晶体管手册，可选用额定正向电流为 100mA、最大反向电压 100V 的整流二极管 2CZ82C 四只。

（3）滤波电容选择。

根据表 12-2 及前面计算结果可知，可选用 500μF 电解电容器。

根据电容器耐压公式有

$$U_C \geq \sqrt{2}U_2 \approx 1.414 \times 20 \approx 28\text{（V）}$$

因此，可选用容量为 500μF，耐压为 50V 的电解电容器。

12.2.2 电感滤波电路

电容滤波在大电流工作时滤波效果较差，当一些电气设备需要脉冲小、输出电流大的直流电时，往往采用电感滤波电路，即在整流输出电路中串联带铁芯的大电感线圈。通常称这线圈为阻流圈，如图 12-13（a）所示。

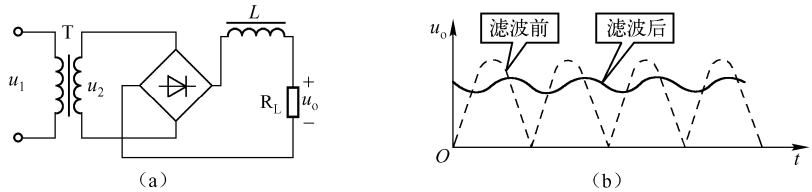


图 12-13　单相桥式整流电感滤波

电感线圈的直流电阻很小，所以脉冲电压中直流分量很容易通过电感线圈，几乎全部加到负载上；而电感线圈对交流的阻抗很大，因此脉冲电压中交流分量很难通过电感线圈，大部分降落在铁芯线圈上。根据电磁感应原理，线圈上通过变化的电流时，它的两端会产生自感电动势来阻碍电流变化。当整流输出电流由小增大时，它的抑制作用使电流只能缓慢上升；而整流输出电流减小时，它又使电流只能缓慢下降，这样就使得整流输出电流变化平缓，其输出电压平滑性比电容滤波好，如图 12-13（b）中实线所示。

一般情况下，电感越大，滤波效果就越好。但电感太大，体积变大，成本上升，且输出电压会下降，所以滤波电感常取几亨到几十亨。有些整流电路是感性负载，负载本身就起到平滑脉动电流的作用，这时可以不必另加滤波电感。

电感滤波主要用于大电流负载或负载经常变化的场合。整流二极管的导电角大，峰值电流小，输出特性较平坦。但因为存在铁芯，所以笨重、体积大，易引起电磁干扰。

12.2.3 复式滤波电路

为了进一步提高滤波效果，可以将电容器和电感器（或电阻器）组合成复式滤波电路。

1. LC 型滤波电路

在电感滤波电路的基础上，再在 R_L 上并联一个电容器，便构成如图 12-14 所示的 LC 型滤波电路。脉动直流电经过电感器 L，交流成分被削弱，再经过电容器滤波，将交流成分进一步滤除，就可在负载上获得更加平滑的直流电压。

LC 型滤波电路带负载能力较强，在负载变化时，输出电压比较稳定。又由于滤波电容器接于电感器之后，因此可使整流二极管免受浪涌电流的冲击。

2. LC-π 型滤波电路

在 LC 型滤波电路的输入端再并联一个电容器，便构成 LC-π 型滤波电路，如图 12-15 所示。

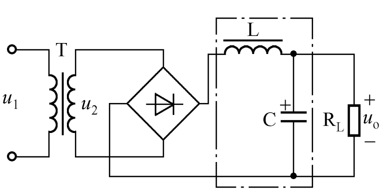


图 12-14　LC 型滤波电路

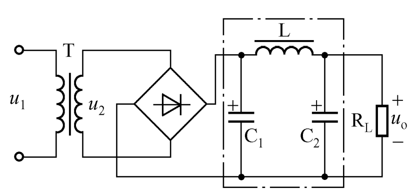


图 12-15　LC-π 型滤波电路

LC-π 型滤波电路的输出电压比 LC 型滤波电路的高，波形也更加平滑。但带负载能力较差，对整流二极管仍存在浪涌电流。为了减小浪涌电流，一般取 $C_1 < C_2$。

3．RC-π 型滤波电路

当负载电流较小时，常选用电阻器 R 代替 LC-π 型滤波电路中的电感器 L，构成 RC-π 型滤波电路，如图 12-16 所示。脉动电压中交流分量在电阻器 R 上产生较大压降，使电容器上的交流分量减少，但由于 R 的存在，同时也会产生直流压降和功率损耗，使输出直流电压降低。一般 R 取几十欧到几百欧，且应满足 $R \ll R_L$。

4．电子滤波电路*

在前面所讲的 RC-π 型滤波电路中，电阻器 R 上的降压损失和滤波效果是一对矛盾，为了解决这一矛盾，可以采用三极管构成电子滤波电路，如图 12-17 所示。

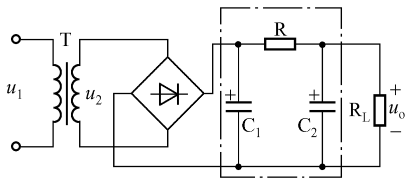


图 12-16　RC-π 型滤波电路

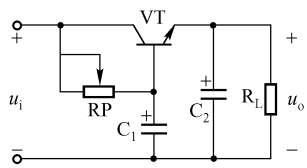


图 12-17　电子滤波电路

图中，电位器 RP 与电容器 C_1 构成滤波电路，由于基极电流很小，RP 可以取得很大，因此可提高滤波效果，得到一个脉冲极小的基极电流。当 RP 调定后，尽管输入的是脉动的直流电压 u_i，三极管的集电极—发射极间电压会随之波动，但由于集电极电流基本不变，负载两端电压也就基本不变，相当于脉动电压中的交流分量被降落在三极管内部。输出电压经电容器 C_2 进一步滤波，就获得了一个电压损失很小、波形又很平滑的直流输出电压。该电路常用在整流电流不是很大但滤波要求较高的场合。RP 取几千欧，C_1 取几微法到 100μF。

12.3　稳压电路*

在实际工作中，经整流滤波后已经变得比较平滑的直流电压，常常因受电网电压波动和负载变化的影响而变化，应采取必要的稳压措施，以保证负载两端的电压基本不变。所以在整流滤波之后，还要接入直流稳压电路来保证输出电压的稳定。

所谓稳压电路，就是当电网电压波动或负载发生变化时，能使输出电压稳定的电路。下面介绍一种最简单的硅稳压管稳压电路。

12.3.1　简单的稳压电路

1．硅稳压二极管的工作特性

稳压管实质上也是一种半导体二极管，它具有稳定电压的特点，常把这种二极管称为稳压二极管。如图 12-18 所示的是稳压二极管的伏安特性曲线。

从伏安特性曲线可以看出：

（1）它的正向特性与普通二极管相同。

（2）它的反向特性比普通二极管陡峭，当反向电压较小时，二极管中只有极微的反向饱和电流，当反向电压达到一定数值 U_Z 时，电压只要稍有增加，反向电流就会增加很多，这种现象称为“击穿”，U_Z 叫击穿电压，稳压管就工作在这个区域内，U_Z 也就是稳压管的稳定电压。

由以上分析可知：稳压管的工作范围是在反向击穿区域内，当稳压管的电流在很大范围内变化时，稳定电压 U_Z 却几乎保持不变。利用这个特性就能实现稳压作用。

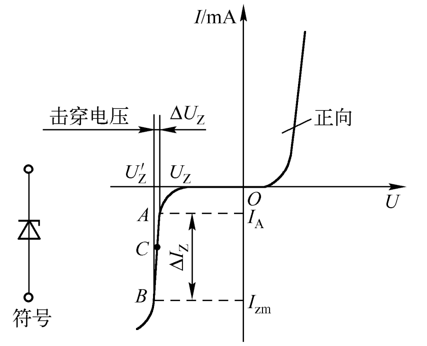


图 12-18　稳压二极管伏安特性曲线和符号

由于稳压管工作在反向击穿区域，因而当它接在电路中工作时，应该反接，即它的正极接电源的负极；而它的负极应接电源的正极。这与一般二极管的电源连接是有区别的。

需要指出的是，稳压管在工作时，随着反向电流的急剧增大，PN 结的温度将迅速升高，如不加以限制，可能损坏管子。为了保证它能长期安全地工作在反向击穿状态，需在电路中串联限流电阻。

2．硅稳压二极管的主要参数

1）稳定电压 U_Z

稳定电压是指在稳定范围内，加在稳压管两端的反向电压，如图 12-18 曲线中 U_Z 到 U'_Z 范围。对于某一型号的稳压管，它们的稳定电压值并不相同。

2）稳定电流 I_Z

稳定电流是指维持稳定电压的工作电流，即曲线 C 点处的电流。

3）最大稳定电流 I_{ZM}

最大稳定电流是指稳压管的最大工作电流，见曲线 B 点处电流。若超过这个电流，稳压管的功耗将超过额定值，管子将因发热而损坏。

4）动态电阻 R_Z

在稳压范围内，稳压管两端电压的变化量与流过它的电流变化量之比，即

$$R_Z=\frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \tag{12-9}$$

由这个关系式可知，动态电阻 R_Z 越小，表明一定的电流变化所引起的稳压值变化越小，则稳压性能就越好。

常用稳性管的主要参数列于表 12-3 中。

表 12-3　常用稳性管的主要参数

型 号 参 数	2CW52	2CW104	2VW114	2DW130	2DW143
额定电压/V	3.2～4.5	5.5～6.5	18～21	42～55	190～220
额定电流/mA	10	30	10		
最大额定电流/mA	55	150	47	180	45
耗散功率/W	0.25	1	1	10	10
温度系数/%℃	≤-0.08	-0.03～+0.05	≤0.11	≤0.12	≤0.12

3．简单的硅稳压管电路

1）电路组成

图 12-19 是利用硅稳压管组成的简单稳压电路。电阻器 R 可利用它两端电压的升降使输出电压 U_L 趋于稳定。

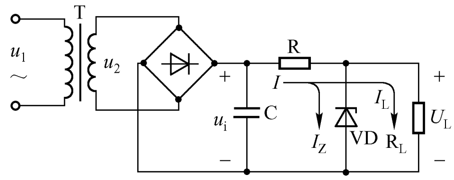


图 12-19　硅稳压管稳压电路

稳压管 VD 反接在直流电源两端，使它工作在反向击穿区。经电容滤波后的直流电压通过电阻器 R 和稳压管 VD 组成的稳压电路接到负载上。这样，负载上得到的就是一个比较稳定的电压。

由图 12-19 所示可以看出，经整流滤波后得到的直流电压 U_I，再经过 R 和 VD 组成的稳压电路后送到负载上，其电压与电流之间的关系为

$$U_I = U_R + U_L$$
$$I = I_Z + I_L$$

2）稳压原理

（1）负载电阻 R_L 不变而电网电压变化使 U_I 变化。

若电网电压波动升高，则使整流滤波输出电压 U_I 上升，引起负载两端电压 U_L 增加。根据稳压管反向击穿特性，只要 U_L 有少许增大，则 I_Z 显著增加，使流过 R 的电流 I 增加，R 上压降 I_R 增大，从而抵消 U_I 的增加，使 U_L 保持稳定。其工作过程可描述为（用“↑”表示增加，用“↓”表示减小）

$$U_I\uparrow \to U_L\uparrow \to I_Z\uparrow \to I\uparrow \to I_R\uparrow \to U_L\downarrow$$

同理，如果电网电压波动使输出电压 U_I 减小，其工作过程与上述相反，U_L 仍保持稳定。

（2）假定电网电压不变而负载 R_L 变化。

R_L 减小，引起 U_L 下降，U_L 的下降又引起 I_Z 减小，从而减小了 R 上的电压降，使 U_L 上升而基本维持不变。上述过程可描述为

$$R_L\downarrow \to U_L\downarrow \to I_Z\downarrow \to I\downarrow \to I_R\downarrow \to U_L\uparrow \to U_L\uparrow$$

同理，当负载增大，稳压过程相反，同样使 U_L 基本维持不变。

从以上分析可知，限流电阻器 R 不仅有限流作用，而且还起调节电压的作用，与稳压管配合共同稳定输出电压。稳压管 VD 作为电压调整器件与负载电阻器 R_L 并联，故也称为并联型稳压电路。

4．简单的串联型稳压电路

利用晶体管组成的串联型稳压电路如图 12-20 所示，晶体管作为调整元器件与负载串联。

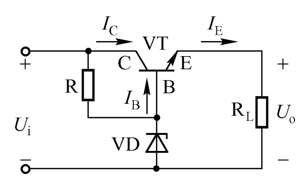


图 12-20　串联型稳压电路

图 12-20 所示电路中，电阻器 R 既是稳压二极管 VD 的限流电阻，又为晶体管 VT 的基极电流提供通路，保证晶体管工作在放大状态。

稳压二极管 VD 工作在反向击穿状态，其两端电压稳定，几乎不随外电路状态而变化，可以认为是恒定在稳压值上。输入电压 U_I、晶体管的集电极和发射极之间电压 U_{CE} 与输出电压 U_L 是串联关系。

当电源波动或负载变化引起输出电压变化时，串联型稳压电路的稳压过程为

$$U_L\downarrow \to U_E\downarrow \to U_{BE}\uparrow\ (=U_{B恒定}-U_E\downarrow) \to I_B\uparrow \to I_C\uparrow \to I_E\uparrow \to I_ER_L\uparrow \to U_L\uparrow$$

反之，若 U_L 增加，经电路的调节作用，会使 U_L 减少，使输出电压保持近似不变。

12.3.2 集成稳压器

利用分立元器件组装的稳压电路，输出功率大、安装灵活、适应性广，但体积大、焊点多、调试麻烦、可靠性差。随着电子电路集成化的发展和功率集成技术的提高，出现了各种各样的集成稳压器。所谓集成稳压器，是指将调整管、取样放大电路、基准电压电路、启动和保护电路等全部集成在一块半导体芯片上而形成的一种稳压集成块。

集成稳压器有多种类型。按原理可分为串联调整式、并联调整式、开关调整式三种，按引出端大体可分为三端集成稳压器和多端集成稳压器。其中三端集成稳压器发展很快，产品采用和三极管同样的金属封装或塑料封装，不仅外形像三极管，使用、安装也和三极管一样简便，如图 12-21 所示。

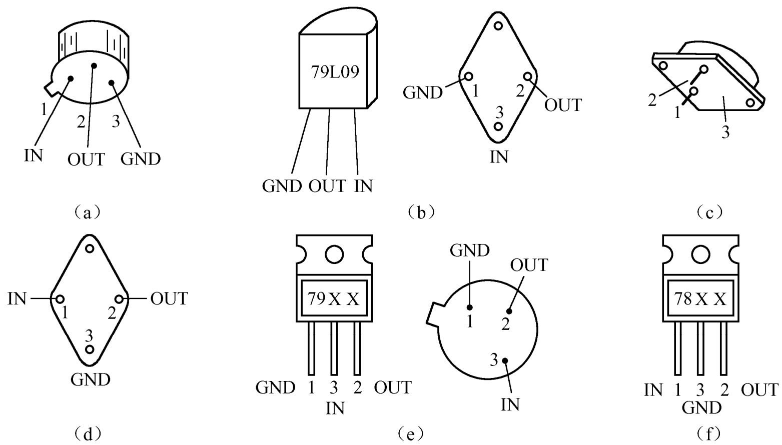


图 12-21　几种三端集成稳压器外形及封装

1. 三端固定输出稳压器

三端固定式集成稳压器的三端是指电压输入、电压输出、公共接地三端。所谓“固定”是指该稳压器有固定的电压输出。典型的产品有 CW78××正电压输出系列和 CW79××负电压输出系列。其型号意义如下：

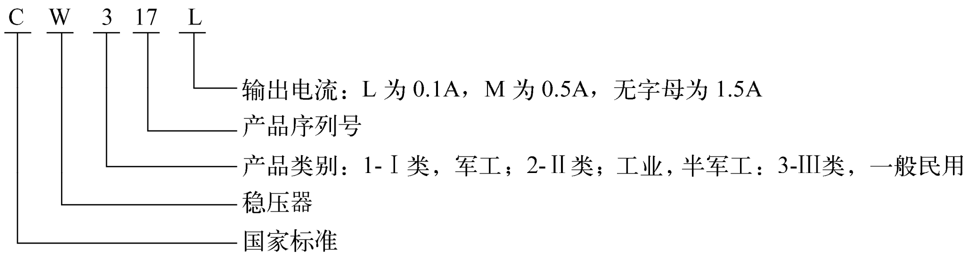
C　W　78(79)　L　××

- ××：用数字表示输出电压
- L：输出电流：L 为 0.1A，M 为 0.5A，无字母为 1.5A
- 78(79)：78 为输出固定正电压，79 为输出固定负电压
- W：稳压器
- C：国家标准

例如，CW7812 表示输出电压＋12V、输出电流 1.5A 的固定式稳压器；CW79L05 表示输出电压-5V、输出电流 100mA 的固定式稳压器。

2．三端可调输出稳压器

三端可调式集成稳压器的三端可调式集成稳压器的三端是指电压输入、电压输出、电压调整三端，其输出电压为可调，而且也有正负之分。比较典型的产品有输出正电压的 CWl17/CW217/CW317 系列及输出负电压的 CW137/CW237/CW337 系列，它们的输出电压分别在±（1.2～37V）之间连续可调。其型号意义如下：



3．集成稳压器主要参数

（1）最大输入电压 U_{imax}。指稳压器允许输入的最大电压。

（2）最小输入输出压差（U_i-U_L）$_{min}$。U_i 表示输入电压，U_L 表示输出电压，此参数表示能保证稳压器正常工作所要求的输入电压与输出电压的最小差值。由此参数与输出电压之和决定稳压器所需要的最低输入电压。如果输入电压过低，使输入、输出电压差小于（U_i-U_L）$_{min}$，则稳压器输出纹波变大，性能变差。

（3）输出电压范围。指稳压器参数符合指标要求时的输出电压范围。对三端固定输出稳压器，其电压偏差范围一般为±5%；对三端可调输出稳压器，应适当选择外接取样电阻分压网络，以建立所需的输出电压。

（4）最大输出电流 I_{LM}。指稳压器能够输出的最大电流值，使用中不允许超出此值。

4．三端集成稳压器的应用

三端集成稳压器内部电路设计完善，辅助电路功能齐全，只需连接很少的外围元器件，就能构成一个完整的电路，并可以实现提高输出电压、扩展输出电流以及输出电压可调等多种功能。下面介绍几种常见的应用电路。

1）三端固定输出稳压器的应用

如图 12-22（a）所示是 CW78××系列组成的输出固定正电压的稳压电路。输入电压接 1、3 端，由 2、3 端输出稳定的直流电压。电容器 C_1 用做滤波，以减少输入电压 U_i 中的交流分量，还有抑制输入电压的作用。电容器 C_2 用来改善负载的瞬时特性，一般不需要大容量的电解电容器。CW79××系列输出固定负电压，其组成部分和工作原理与 CW78××系列基本相同，应用于只需负输出的场合，如图 12-22（b）所示。

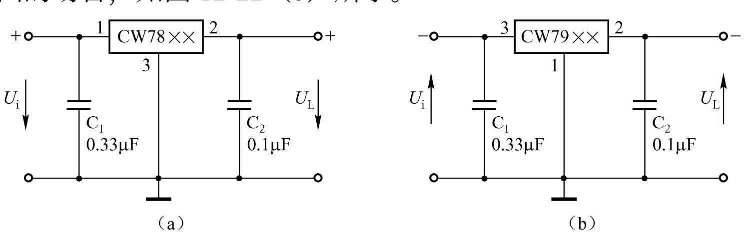


图 12-22　输出固定电压的稳压电路

使用中要注意以下几点。

（1）在接入电路前，要弄清各引脚的作用。如 CW78××系列和 CW79××系列稳压器的引脚就有很大不同。

（2）使用时，对要求加散热装置的场合，必须加符合条件的散热装置。

（3）严禁超负荷使用。

（4）安装焊接要牢固可靠，并避免有大的接触电阻而造成压降和过热。

2）三端可调输出稳压器的应用

图 12-23（a）、（b）分别是 CW317 和 CW337 的基本接线方法。图中 R、RP 通常称为取样电阻器，调节 RP，即可在允许范围内调节输出电压的值。其输出电压为

$$U_o \approx 1.25\,(1 + RP/R) \tag{12-10}$$

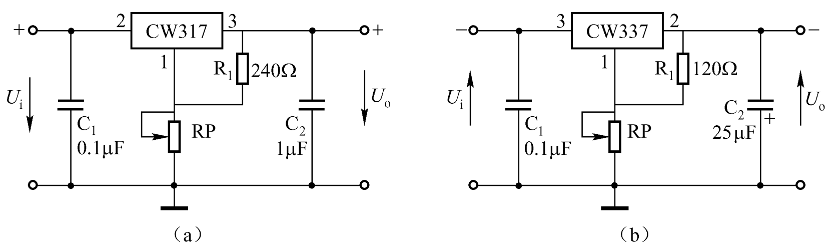


图 12-23　输出固定电压的稳压电路

使用中要注意以下几点。

（1）R 要紧靠在稳压器的输出端和调整端进行接线，以免当输出电流较大时，附加压降影响输出精度。

（2）RP 的接地点应与负载电流返回接地点相同。

（3）R 和 RP 应选择由同种材料制作的电阻器，精度尽量高一点。

（4）电路中输出端电容器 C_2 用 1μF 钽电容器或用 25μF 的电解电容器。

12.4　技能训练 15　家用调光台灯的安装

12.4.1　技能训练目标

（1）掌握电子元器件好坏和极性的判别方法。

（2）掌握电路焊接的基本技能。

12.4.2　技能训练仪器和器件

（1）电子装配工具套件。

（2）电烙铁；万用表；调光台灯套件；连接导线；焊锡。

12.4.3　技能训练内容与步骤

1．清点元器件

按图 12-24 所示电路，核对元器件的数量、型号和规格，如有短缺、差错应及时补缺和更换。

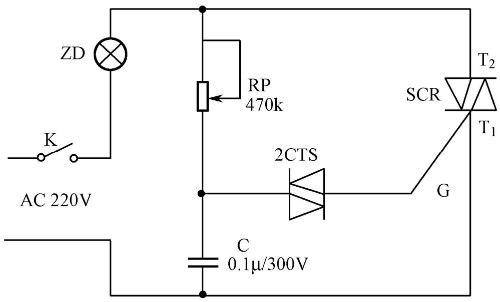


图 12-24　调光灯工作原理图

2．元器件的检测

用万用表的电阻挡对元器件逐一进行检测，对不符合质量要求的元器件剔除并更换。

3．元器件引脚加工

把电子元器件引脚和印制电路板上的氧化物清除干净，并对元器件做合适的整形。

4．元器件安装与焊接

按图 12-25 所示的印制电路板装配图将元器件安装并焊接在印制电路板上。

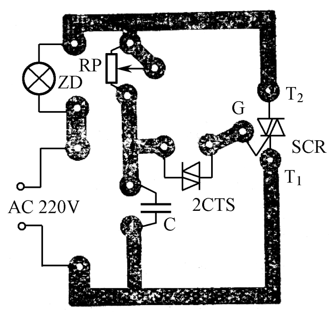


图 12-25　调光灯印制电路板图

5．通电

检查无误后，经教师同意，接通台灯电源，调节电位器，观察白炽灯亮度的变化，并记录于表 12-4 中。

表 12-4　调光台灯通电检测电路

电位器位置	右	中	左
灯光亮度			

12.4.4　注意事项

（1）先用万用表检测元器件的质量。

（2）不准甩动使用中的电烙铁，以免焊锡甩出伤人。

（3）注意安全用电，不得触碰带电体。

12.4.5　创新能力的启发和培养

怎样设计三端稳压器电路？

提示：查阅三端稳压器的型号、引脚和稳压电路的组合，设计输出 9V 的三端稳压器电路。

12.4.6 思考问题

（1）查找资料了解双向晶闸管是怎样工作的。
（2）为什么调节 RP 便能改变灯泡的亮度？
（3）印制电路板的作用是什么？

12.4.7 实训要求

（1）分析调光灯电路的工作原理。
（2）熟练掌握焊接电子元器件的步骤。
（3）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 12

1. 什么是整流？如何采用半导体管进行整流？
2. 滤波的作用是什么？可采用哪些方法进行滤波？
3. 稳压可采用哪些方法？稳压的技术指标用什么衡量？
4. 三端集成稳压器的符号怎样选择？如何连接稳压电路？

教学微视频

扫一扫

第 13 章　放大电路和集成运算放大器

【本章学习目标】

1. 了解放大电路的基本概念、分类及组成。
2. 掌握共发射极放大电路的组成、工作原理、分析方法及计算。
3. 理解反馈的概念及反馈对放大器性能的影响，了解静态工作点稳定原理。
4. 了解功率放大器的功能及应用电路的工作原理。
5. 掌握正弦波振荡电路的组成及常见振荡电路的工作原理、特点和振荡频率。
6. 了解集成运算放大器的分类、组成、型号，掌握集成运放的符号。
7. 理解理想集成运放的特性及分析方法。

【教学目标】

1. 知识目标：掌握共发射极放大电路的结构和主要元器件的作用；了解反馈的概念及负反馈对放大电路性能的影响。

2. 能力目标：会安装和调试共发射极基本放大电路。

【教学重点】

共发射极放大电路的组成及工作原理。

【教学难点】

反馈的概念及负反馈对放大器性能的影响。

【教学方法】

读书指导法、分析法、演示法、练习法。

放大电路是将微弱的电信号进行放大，转变成较强的电信号的电子电路，放大电路是组成其他各种电子电路的基础，应用十分广泛。

对放大电路的主要要求：第一，要有一定的放大能力，放大后的输出信号电压（电压放大器）或输出信号功率（功率放大器）达到所需的要求；第二，失真要小，即放大后输出信号的波形应尽可能保持与输入信号波形一致。

放大电路的分类：按工作频率的高低来划分，可分为直流放大电路、低频放大电路、中频放大电路、高频放大电路；按用途来分，有电压、电流和功率放大电路；按晶体管的连接方式来分，有共发射极、共基极、共集电极放大电路；按元器件的集成度来分，有分立元器件放大电路和集成放大电路；按信号的强弱分，又可分为小信号放大器和大信号放大器等。

13.1 共发射极基本放大电路

在三极管放大电路中，因为它与外部电源、信号源及元器件的电路组合方式不同，所以它的工作特性也不同。按照输入电路与输出电路的交流信号公共端（电路中各点电位的参考点）

的不同，三极管放大电路可分为共发射极、共基极和共集电极三种基本放大电路。这种接法上的改变使放大电路的性能发生了变化，并各具特色。

13.1.1 共发射极基本放大电路的组成

1．电路组成

如图 13-1 所示是由三极管 VT 组成的共发射极放大电路（又称固定偏置电路）。整个电路分为输入回路和输出回路两个部分。基极与发射极构成输入回路，用来接收输入信号 u_i。集电极与发射极构成输出回路，将放大后的交流信号 u_o 输出到外接负载 R_L 上。由图可见电路中只有一个放大器件，且以三极管的发射极作为输入回路和输出回路的公共电极，故称为共发射极放大电路。

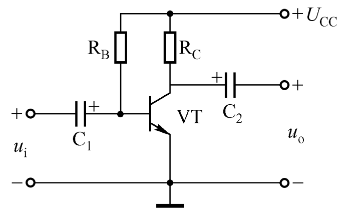


图 13-1　共发射极放大电路

2．元器件作用

1）三极管 VT

它是放大器的核心，起电流控制作用，可将微小的基极电流变化量转换成较大的集电极电流变化量。

2）基极偏置电阻器 R_B

U_{CC} 经 R_B 为三极管提供合适的基极电流 I_B（称基极偏置电流）。以后会看到，I_B 的大小将直接影响放大器的工作状态。

3）集电极负载电阻器 R_C

其作用是将集电极电流的变化量变换成集电极电压的变化量。

4）耦合电容器 C_1 和 C_2

其作用有两点：隔断直流，使三极管中的直流电流与输入端之前的以及输出端之后的直流电路隔开，不受它们的影响；耦合交流，当 C_1、C_2 的电容量足够大时，它们对交流信号呈现的容抗很小，可近似认为短路，这样就可使交流信号顺利地通过。在低频范围内，C_1 和 C_2 应选用容量较大的电解电容器，一般为几微法至几十微法。若信号频率较高，则可选用小容量的电容器。

5）直流电源 U_{CC}

有两个作用：一是为晶体管 VT 提供发射结正偏、集电结反偏所需的电压；二是为放大电路提供能源。

需要说明的是，信号源和负载不是放大器的组成部分，但它们对放大器有影响。同时，电路中的负载并不一定是一个实际的电阻器，而是表示某种用电设备，如仪表、扬声器、显像管、继电器或下一级放大电路等。

13.1.2 共发射极基本放大电路的工作原理

下面分两种情况讨论电路的工作原理：一是无输入信号，电路处于静止状态（$u_i=0$，静态）时的情况；二是输入交流信号 u_i，放大电路进入交流工作状态（动态）时的情况。

1．静态工作情况

在放大器没有输入信号（$u_i=0$）时，三极管的基极回路和集电极回路中只有直流通过，放大器这时的状态称为静态，如图 13-1 所示。静态时的基极电流、集电极电流、基极与发射极之间的电压和集电极与发射极之间的电压分别用 I_{BQ}、I_{CQ}、U_{BEQ} 和 U_{CEQ} 表示。通常将静态时

的基极电流 I_{BQ} 称为基极偏置电流，在三极管输出特性曲线上，将 I_{CQ} 和 U_{CEQ} 的交点 Q 称为放大器的静态工作点，如图 13-2 所示。

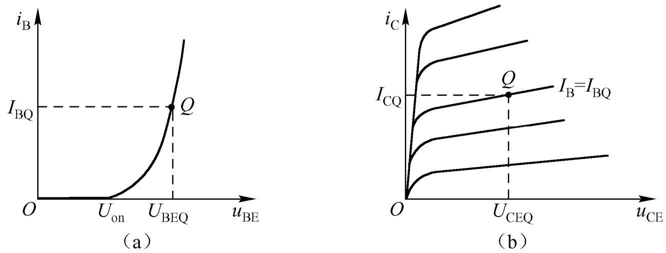


图 13-2　静态工作点的表示

设置静态工作点的目的是给晶体管的发射结预先加上一个适当的正向电压，以保证在 u_i 的整个周期内，放大器都工作在放大状态，避免信号在放大过程中产生失真。

2．动态工作情况

在如图 13-1 所示电路中，设交流信号 u_i（如图 13-3（a）所示）通过电容器 C_1 加到基极，基极电压和基极电流将发生变化，基极总电流也就是静态时的基极偏置电流 I_{BQ} 和输入信号 u_i 引起的交变电流 i_i 的总和，波形如图 13-3（b）所示，即

$$i_B = I_{BQ} + i_b \tag{13-1}$$

由于三极管的电流放大作用，即有 $i_C = \beta i_B$，则

$$i_C = \beta i_B = \beta (I_{BQ} + i_b) = I_{CQ} + i_c \tag{13-2}$$

可见集电极总电流也是静态时的集电极电流 I_{CQ} 和输入信号 u_i 引起的交变电流 i_c 的总和，波形如图 13-3（c）所示。

同样，集电极总电压也是静态时的集电极电压 U_{CEQ} 和交流电压 u_{CE} 的总和，即

$$\begin{aligned} u_{CE} &= U_{CC} - (I_{CQ} + i_c) R_C \\ &= U_{CC} - I_{CQ}R_C - i_c R_C \end{aligned} \tag{13-3}$$

由于 $U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}R_C$

所以

$$\begin{aligned} u_{CE} &= U_{CEQ} - i_c R_C \\ &= U_{CEQ} + (-i_c R_C) = U_{CEQ} + u_{CE} \end{aligned} \tag{13-4}$$

由此可见，集电极与发射极之间的总电压由两部分组成，其中的 U_{CEQ} 为直流电压，u_{CE} 为交流电压，波形如图 13-3（d）所示。由于电容器 C_2 的隔直作用，所以放大器的输出电压只有交流分量，即

$$u_o = u_{CE} = -i_c R_C \tag{13-5}$$

式中，负号表示 u_o 与 u_i 相位相反，这种性质称为共发射极放大电路的反相作用。输出电压波形如图 13-3（d）中 u_{CE} 所示。

通过以上分析，可以得出如下结论：在单级共发射极放大器中，输出电压 u_o 与输入电压 u_i 频率相同，波形相似，幅度得到放大，而它们的相位相反。

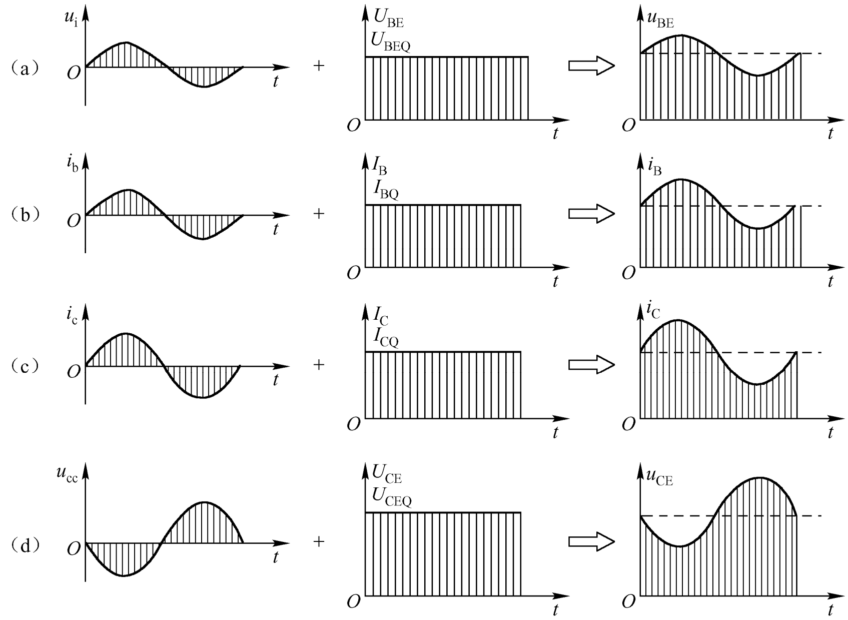


图 13-3　放大器各级电压、电流波形分析

13.1.3　共发射极基本放大电路的组成原则

需要理解的是，不能简单地认为只要对输入电压进行了放大就是放大器。从本质上说，上述电压放大作用是一种能量转换作用，即在很小的输入信号功率控制下，将电源的直流功率转变成了较大的输出信号功率。其能量的提供来自于放大电路中的直流电源；晶体管在放大电路中只是实现了对能量的控制，使之转换成信号能量，并传递给负载。因此，放大电路组成的原则首先，必须有直流电源，而且电源的设置应保证晶体管工作在线性放大状态；其次，放大电路中各元器件的参数和安排上，要保证被传输信号能够从放大电路的输入端尽量无衰减地输入，在信号传输过程中能够不失真地放大，最后，经放大电路输出端输出，并满足放大电路的性能指标要求。

综上所述，基本共发射极放大电路的组成必须遵循以下几个原则。

1．直流电源要保证晶体管工作在放大状态，并作为输出的能源

对于晶体管放大电路，电源的极性和大小应使晶体管基极与发射极之间（发射结）处于正向偏置，静态电压$|U_{BEQ}|$大于开启电压 U_{on}（硅管 0.7V，锗管 0.3V），如图 13-2（a）所示；而集电极与基极之间（集电结）处于反向偏置；即保证晶体管工作在放大区。

2．偏置电阻与电源配合使放大管有合适的静态工作点

基极偏置电阻 R_B，一般为几十千欧到几百千欧，通常 R_B 的数量级为 10～100kΩ；电极负载电阻 R_C，一般为几千欧到十几千欧。

3．输入信号必须能够作用于放大管的输入回路

对于晶体管，输入信号必须能够改变基极与发射极之间的电压，产生 Δu_{BE}，或改变基极电流，产生 Δi_B。这样，才能改变放大管输出回路的电流，从而放大输入信号。

4．输出回路的设置应保证放大后的电流信号能够转换成负载需要的电压形式

除了合适地选择电极直流偏置电阻器 R_C 外，当交流负载接入时，必须保证放大管输出回路的动态电流能够作用于负载，从而使负载获得比输入信号大得多的信号电流或信号电压，且放大后的信号不允许出现失真。

13.1.4　静态工作点的设置和稳定

信号在放大过程中，总是希望信号的幅值得到增大而信号的波形不变。假如信号经过放大器后，输出信号的波形与输入信号相差很远，放大就显得没有意义了。输出波形与输入波形不完全一致称为波形失真。由于特性曲线非线性引起的波形失真称为非线性失真。产生非线性失真的原因与静态工作点选择的是否合适有关。

1．波形失真与静态工作点的关系

在如图 13-1 所示的电路中，静态工作点 Q 对放大电路输出波形影响很大。

1）工作点偏高易引起饱和失真

Q 点上移，直至输出信号电压波形负半周被部分削平，这一现象称为“饱和失真”，如图 13-4 中的 Q_A 点。

消除饱和失真的方法是，增大 R_B，以减小 I_{BQ}，使 Q 点适当下移。

2）工作点偏低易引起截止失真

Q 点下移，直至输出信号电压波形正半周被部分削平，这一现象称为“截止失真”，如图 13-4 中的 Q_B 点。

消除截止失真的方法是，减小 R_B 以增大 I_{BQ}，使 Q 点适当上移。

需要注意的是，如果输入信号幅度过大，则会同时出现截止失真和饱和失真，这时要对输入信号适当地加以限制。

由图 13-4 可以看出，为了获得幅度大而不失真的交流输出信号，放大器的静态工作点应选在交流负载线的中点 Q 处。

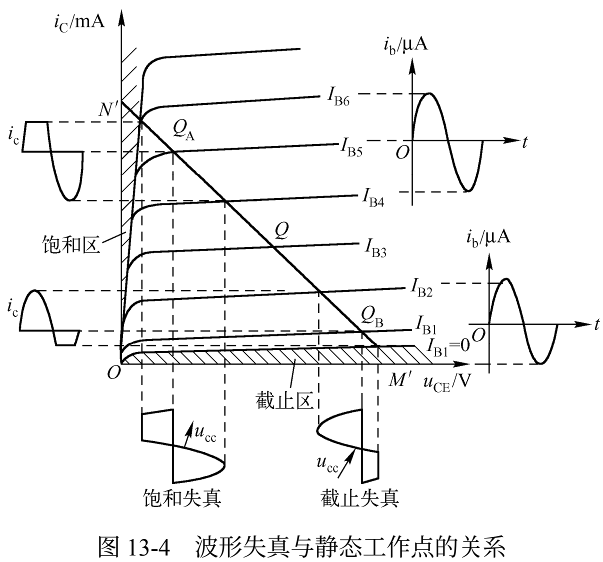


图 13-4　波形失真与静态工作点的关系

2．影响静态工作点稳定的因素

在实际应用中，环境温度的变化、三极管的更换、电路中元器件的老化及电源电压的波动等，都可能使放大器的静态工作点发生变化，造成放大电路的静态工作点不稳定。其中，最主要的原因是温度变化的影响，因为三极管的特性和参数对温度的变化特别敏感。

一般情况下，温度每升高 10℃，三极管的 I_{BQ} 增大 1 倍，而 $I_{CEO}=(1+\beta)I_{CBO}$，这样将使静态工作点 $I_{CQ}=\beta I_{BQ}+I_{CEO}$ 增加，Q 点上移接近饱和区而出现饱和失真。

因此，为了使工作点稳定，应设法使在温度变化时，I_{CQ} 保持稳定不变。通常采用分压式偏置电路来实现。

3．分压式偏置放大电路

1）电路组成

如图 13-5 所示，在图 13-1 电路的基础上，基极增加了一个下偏置电阻器 R_{B2}，发射极增加了一个发射极电阻器 R_E 和一个交流旁路电容器 C_E。R_{B2} 与 R_{B1} 分压后保证三极管基极有合适的直流电压 U_{BQ}；R_E 具有稳定直流工作点的作用；C_E 为交流信号提供了通路，使放大器的交流放大能力不至于因 R_E 的接入而下降很多。这种偏置电路又称为分压式射极偏置放大电路。

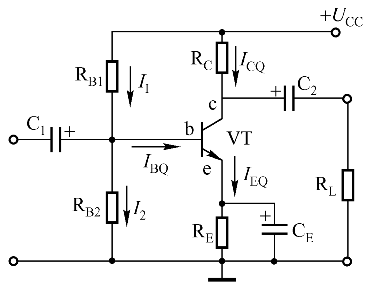


图 13-5　分压式偏置放大电路

2）稳定静态工作点的原理

适当选择 R_{B1} 和 R_{B2} 的值，使 I_1 远远大于 I_{BQ}，这时基极电压 U_{BQ} 就由 R_{B1} 和 R_{B2} 分压比确定，即

$$U_{BQ}\approx\frac{R_{B1}}{R_{B1}+R_{B2}}U_{CC} \tag{13-6}$$

由于接入了发射极电阻器 R_E，发射极直流电流 I_{EQ} 在其上产生直流电压，加到发射结的直流电压则为

$$U_{BEQ}=U_{BQ}-U_{EQ} \tag{13-7}$$

当温度 T 升高而引起 I_{CQ} 增大时，I_{EQ} 和 U_{EQ} 也相应增大。由于 U_{BQ} 基本不变，由式（13-6）可知，U_{BEQ} 就减小，I_{BQ} 随之减小，从而抑制了 I_{CQ} 的增大，最终使静态工点趋于稳定。

上述过程可表示为

$$T\uparrow\rightarrow I_{CQ}\uparrow\rightarrow I_{EQ}\uparrow\rightarrow U_{EQ}\uparrow\rightarrow U_{BEQ}\downarrow\rightarrow I_{BQ}\downarrow\rightarrow I_{CQ}\downarrow$$

由以上分析可知，主要是由于 R_E 对 I_{CQ} 变化的抑制作用，才使放大器的静态工作点得到了稳定，这种抑制作用实质上就是一种负反馈。有关负反馈的原理将在 13.3 节中讨论。

13.1.5 共发射极基本放大电路的交流性能分析*

由前面内容可知，放大电路在放大交流信号时，是把交流信号叠加在直流电量上，以实现不失真的放大。如图 13-1 所示基本共发射极放大电路（或如图如 13-5 所示分压式放大电路）的电压放大倍数、输入电阻和输出电阻都是很重要的交流性能指标，下面分别进行简要介绍。

1．电压放大倍数 A_u

电压放大倍数定义为输出电压 u_o 与输入电压 u_i 之比，反映了放大电路对电压的放大能力，

用 A_u 表示，即

$$A_u=\frac{u_o}{u_i} \tag{13-8}$$

如图 13-1 所示基本共发射极放大电路（或如图 13-5 所示分压式放大电路）经理论推导或实际测量，有

$$A_u=\frac{u_o}{u_i}=\frac{-\beta R'_L i_b}{r_{be}i_b}=-\frac{\beta R'_L}{r_{be}} \tag{13-9}$$

式中，$R'_L=\frac{R_C R_L}{R_C+R_L}$；$r_{be}=\frac{u_{be}}{i_b}$，通常为 1kΩ 左右。“ - ” 号表示输出、输入信号反相。

放大电路输出端空载时，$R'_L=R_C$，电压放大倍数为

$$A_u=-\frac{\beta R_C}{r_{be}} \tag{13-10}$$

因为 $R_C>R'_L$，所以，放大电路输出端带载时，电压放大倍数下降，即输出电压减小。

2．输入电阻 r_i

放大电路的输入电阻是从放大电路的输入端看进去的交流等效电阻。对于图 13-1，可得

$$r_i=R_B /\!/ r_{be}\approx r_{be} \tag{13-11}$$

对于图 13-5 可得

$$r_i=R_{B1} /\!/ R_{B2} /\!/ r_{be}\approx r_{be} \tag{13-12}$$

r_{be} 是晶体三极管的基极与发射极间的交流等效电阻，$r_{be}=300+(1+\beta)\frac{26}{I_{EQ}}$（Ω）。

R_i 反映放大电路对所接信号源（或前一级放大电路）的影响程度。放大电路与信号源相接后，放大电路的输入电阻就是前级信号源的负载，它的大小表示放大电路向信号源取用信号量的多少。一般来说，希望 R_i 尽可能大一些，以使放大电路向信号源取用的电流尽可能小，以减少前级的负担。

3．输出电阻 r_o

放大电路的输出电阻是从放大电路的输出端看进去的交流等效电阻（不包括负载）。对于图 13-1 和图 13-5 所示电路，其输出电阻一致，为

$$r_o=R_C /\!/ r_{ce} \tag{13-13}$$

三极管工作在放大区时，集电极与发射极间的交流等效电阻 r_{ce} 很大，所以

$$r_o\approx R_C \tag{13-14}$$

输出电阻是衡量放大电路带负载能力的一个性能指标。对于负载来说，放大器是向负载提供信号的信号源，而它的输出电阻就是信号源的内阻。当负载变化时，为了使输出电压稳定，则要求 r_o 小，r_o 越小，带负载的能力越强。

13.2　多级放大电路

实际应用的放大电路通常都是多级的，即把几个单级放大电路适当地连接起来构成的放大

电路。这是因为要把一个微弱的信号放大到能够推动负载（继电器、扬声器等），靠一级放大是不够的。

13.2.1 多级放大电路的组成

多级放大电路通常可分为两大部分，即电压放大（小信号放大）和功率放大（大信号放大），如图 13-6 框图所示。前置级一般根据信号源是电压源还是电流源来选定，它与中间级的主要作用是放大信号电压。中间级一般都用共发射极电路或组合电路组成。末级要求有一定的输出功率供给负载，称为功率放大器，一般由共集电极电路或互补推挽电路，有时也用变压器耦合放大电路。

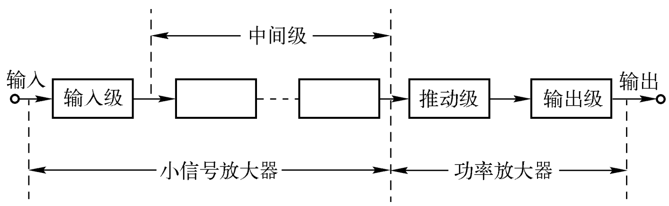


图 13-6 多级放大电路的组成

13.2.2 多级放大电路的耦合方式

在多级放大电路中，级与级之间的连接方式称为级间耦合。通常采用的耦合方式有阻容耦合、变压器耦合和直接耦合三种。

1．阻容耦合

1）电路组成

如图 13-7 所示为两级阻容耦合放大电路。第一级的输出信号通过 R_{C1} 和 C_2 加到第二级的输入电阻上，即信号是通过电阻和电容传递的，故称为阻容耦合。由于耦合电容的隔直作用，前后级放大器的静态工作点互不影响。

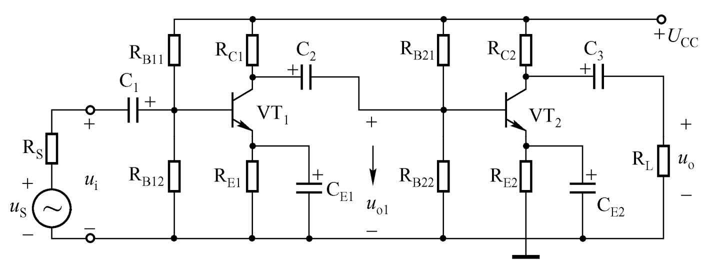


图 13-7 阻容耦合放大电路

2）电路特点

各级静态工作点互相独立、体积小、价格低。但当频率很低时，电容的容抗不能忽略，输出电压比中频时低，低频响应差，级与级之间阻抗严重失配。所以阻容耦合放大电路一般用在前置放大级中作为电压放大器。

2．变压器耦合

1）电路组成

如图 13-8 所示为变压器耦合的两级放大电路。耦合变压器的作用是隔断前后级的直流联

系，同时把前级输出的交流信号通过电磁感应传送到后级。此外，在某些放大电路中，还利用耦合变压器在传递信号的同时实现阻抗变换。

2）电路特点

各级静态工作点互相独立、变压器的阻抗变换可以使级与级之间的阻抗匹配，以获得最大输出功率。但它的低频特性较差，不能传输直流信号，而且体积较大。主要应用于调谐放大器或由分立元器件组成的功率放大器中。

3．直接耦合

1）电路组成

如图 13-9 所示为直接耦合放大电路，其前一级放大电路的输出端与后一级放大电路的输入端直接或通过一个电阻连接起来。

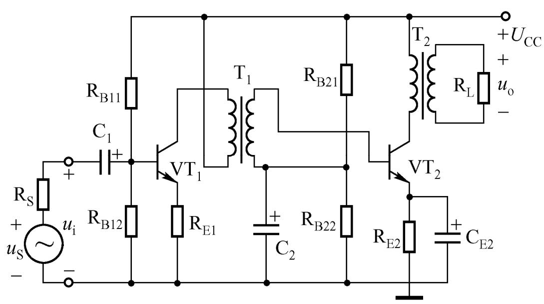


图 13-8　变压器耦合放大电路

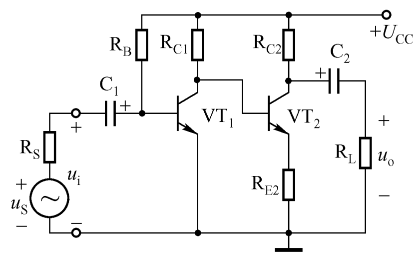


图 13-9　直接耦合放大电路

2）电路特点

电路中没有外加电抗元器件，频率响应好，低频段可以延伸到直流，使用元器件少，适用于线性集成电路。但级与级之间阻抗严重失配，功率增益低；各级的静态工作点相互影响，设计和调整比较麻烦。

13.2.3　多级放大电路的电压放大倍数*

1）多级电压放大倍数

在多级放大电路中，前一级的输出信号电压就是后一级的输入信号电压，如图 13-10 所示。

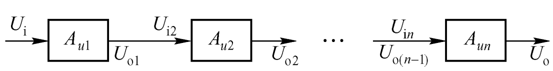


图 13-10　多级电压放大倍数

因此，多级放大电路的总电压放大倍数 A_u 等于各级电压放大倍数的乘积，即

$$A_u=\frac{U_o}{U_i}=\frac{U_{o1}}{U_{i1}}\cdot\frac{U_{o2}}{U_{o1}}\cdots\cdot\frac{U_{on}}{U_{o(n-1)}}=\frac{U_{o2}}{U_{i2}}\cdot\frac{U_{o3}}{U_{i3}}\cdots\cdot\frac{U_{on}}{U_{in}}=A_{u1}A_{u2}\cdots\cdot A_{un} \tag{13-15}$$

2）放大器的增益

用放大倍数的对数形式表示放大电路放大能力的方法称为增益。习惯上人们有时也将放大倍数称为增益。放大电路的增益包括功率增益、电压增益和电流增益。

$$\text{功率增益 } G_p=10\lg A_P \tag{13-16}$$

$$\text{电压增益 } G_u=20\lg A_u \tag{13-17}$$

$$电流增益\ G_i = 20\lg A_i \qquad (13\text{-}18)$$

增益的单位为分贝，以 dB 表示。例如，某放大电路的电压放大倍数 $A_u = 100$，则其电压增益为

$$G_u = 20\lg A_u = 20\lg 100\text{dB} = 40\text{dB}$$

放大电路的放大倍数用对数表示时，可以简化运算过程。例如，计算多级放大电路的电压增益时有

$$\begin{aligned} G_u &= 20\lg A_u = 20\lg (A_{u1}A_{u2}\cdots A_{un}) \\ &= 20\lg A_{u1} + 20\lg A_{u2} + \cdots + 20\lg A_{un} \\ &= G_{u1} + G_{u2} + \cdots + G_{un} \end{aligned}$$

因为它可以将乘法运算变化为加法运算，所以这种方法使计算过程大大简化。

13.3 负反馈放大器

反馈是改善放大器性能的重要手段，也是自动控制系统的一个基本概念，几乎所有的实用放大器都引入了负反馈。因此，了解负反馈对放大电路的影响，是十分必要的。

13.3.1 负反馈的基本概念

1．反馈的定义

从广义上讲，凡是将输出量送回到输入端，并对输入量产生影响的过程都称为反馈。

放大器中的反馈是指将输出量（电压或电流）的一部分或全部通过一定的电路形式送回到输入回路，并与输入量进行叠加的过程。

引入了反馈的放大器称为反馈放大器，它由基本放大器和反馈电路两部分组成，如图 13-11 所示。图中“ ⊗ ”称为比较环节，表示信号在此叠加。输出量经反馈电路处理，获得反馈量送回到输入端，与输入量叠加后，产生净输入量加到放大器的输入端。可见反馈放大器是一个闭合回路，因此反馈放大器通常称为闭环放大器，而未引入反馈的放大器则称为开环放大器。

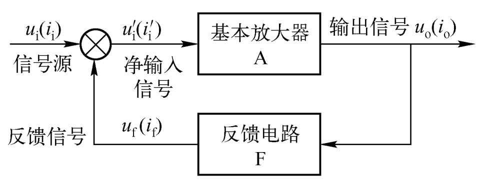


图 13-11　反馈放大器的组成

反馈放大器的特征是存在反馈元器件，反馈元器件联系着放大器的输出与输入，并影响放大器的输入。因此，能否从电路中找到反馈元器件是判断有无反馈的依据。

2．反馈的类型

由于反馈的极性不同，反馈信号的取样对象不同，反馈信号在输入回路中的连接方式也不同。

1）正反馈、负反馈

根据反馈极性的不同，可将反馈分为正反馈与负反馈。使放大器净输入量增大的反馈称为正反馈，使放大器净输入量减小的反馈称为负反馈。放大器中主要采用负反馈，正反馈多用于

振荡电路中。

2）电压反馈与电流反馈

根据反馈信号从输出端取样方式的不同，可分为电压反馈与电流反馈。如果反馈信号取自放大器的输出电压，称为电压反馈；如果反馈信号取自放大器的输出电流，称为电流反馈。电压反馈的取样环节与放大器输出端并联，电流反馈的取样环节与放大器输出端串联。

3）串联反馈与并联反馈

根据反馈信号与输入信号连接方式（也称比较方式）的不同，可分为串联反馈与并联反馈。如果反馈信号在输入端是与信号源串联的，称为串联反馈；如果反馈信号在输入端是与信号源并联的，称为并联反馈。

4）直流反馈与交流反馈

如果反馈量只含有直流量，称为直流反馈；如果反馈量只含有交流量，称为交流反馈。在如图 13-5 所示的分压式偏置放大电路中，如果发射极电阻器 R_E 接有交流旁路电容器 C_E，则 R_E 只对直流量有反馈作用，而对交流量没有反馈作用，即所引入的是直流反馈。如果去掉交流旁路电容 C_E，则 R_E 所引入的就是交、直流反馈了。

直流负反馈主要用于稳定放大器的静态工作点，交流负反馈可以改善放大器的动态特性。

13.3.2 射极输出器*

1．电路组成

如图 13-12 所示是由晶体三极管 VT 组成的共集电极放大电路。由图可见集电极是输入回路和输出回路的公共端，故称为集电极放大电路。在共集电极放大电路中，负载电阻器 R_E 接在发射极上，从发射级输出信号，故共集电极电路又称为射极输出器。

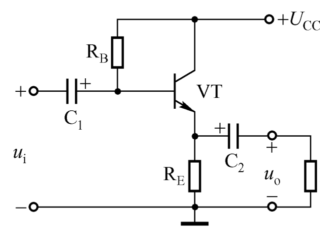


图 13-12　射极输出器电路

2．电路特点

（1）电流放大系数大于 1，而电压放大系数小于 1，即共集电极放大电路有电流放大作用，而无电压放大作用。

（2）输入电压极性和输出电压极性相位相同。

（3）输入电阻大而输出电阻小。输入电阻大，可使流过信号源电流小；输出电阻小，即带负载能力大。

3．射极输出器的应用

射极输出器具有输入电阻高、输出电阻低的特点，在各种电路中应用很广泛。它可以用来作为多级放大电路的输入级、输出级和中间隔离级。

1）用做输入级

在要求输入电阻很高的放大电路中，常用射极输出器作为输入级。利用它输入电阻很高的特点，可减小对信号源的衰减，有利于信号的传输。

2）用做输出级

由于射极输出器的输出电阻很低，常用做输出级。使用射极输出器作为输出级的放大电路接入负载或负载变化时，输出电压变化很小，使输出电压更加稳定。

3）用做中间隔离级

虽然射极输出器的电压放大倍数近似等于 1，但将它接在两极共射放大电路之间时，利用

它输入电阻高的特点，可提高前级的电压放大倍数；利用它输出电阻低的特点，可减小后级对前级的影响，从而提高了前后两级的放大倍数，隔离了级间的相互影响，使前、后级能够得到更好的配合。

13.3.3 负反馈对放大电路的影响

1．负反馈对放大倍数的影响

1）负反馈使放大倍数下降

从负反馈的定义可知，反馈信号与输入信号比较，使净输入信号减小，而基本放大倍数不变，是负反馈作用导致输出信号减小；因此，具有负反馈的放大电路，其放大倍数比不加负反馈时要低。

2）负反馈提高了放大倍数的稳定性

周围环境温度的变化、元器件的老化与更换，以及负载的变化等原因，往往使放大器的特性参数等发生变化，从而导致放大器放大倍数的变化。引入负反馈后，由于它的自动调节作用，使输出信号的变化受到抑制；放大倍数趋于不变，因此提高了放大倍数的稳定性。

2．负反馈对输入电阻的影响

负反馈对输入电阻的影响，只取决于反馈电路在输入端的连接方式，即取决于是串联反馈还是并联反馈。

1）串联负反馈使输入电阻提高

在串联负反馈中，由于反馈电路与输入电阻串联，由电路的基本知识可知，电阻越串越大。因此引入串联负反馈后，使得放大电路的输入电阻增大。

2）并联负反馈使输入电阻下降

在并联负反馈中，由于反馈电路与输入电阻并联，由电路的基本知识可知，电阻越并越小。因此引入并联负反馈后，使得放大电路的输入电阻减小。

3．负反馈对输出电阻的影响

负反馈对输出电阻的影响，只取决于反馈电路在输出端的连接方式，即取决于是电压反馈还是电流反馈。

1）电压负反馈使输出电阻降低

电压负反馈可使输出电压在负载变动时保持基本稳定，使之接近恒压源。因此，电压负反馈使放大电路的输出电阻减小。

2）电流负反馈使输出电阻提高

电流负反馈可使输出电流在负载变动时保持基本稳定，也就是放大电路输出接近恒流源；因此，电流负反馈使放大电路的输出电阻增大。

4．负反馈对放大电路非线性失真的影响

负反馈可以使放大电路的非线性失真减小，还可以抑制放大电路自身产生的噪声。

需要指出的是，负反馈只能减小本级放大器自身产生的非线性失真和自身的噪声，对输入信号存在的非线性失真和噪声则无能为力。

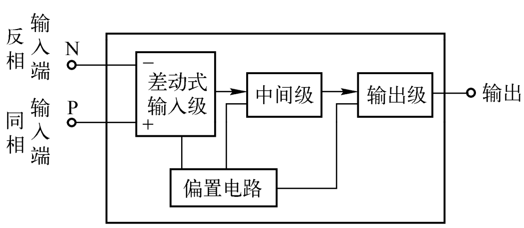
13.4 集成运算放大器及应用

运算放大器是具有高开环放大倍数并带有深度负反馈的多级直接耦合放大电路。它首先应用于电子模拟计算机上，作为基本运算单元，可以完成加减、乘除、积分和微分等数学运算。早期的运算放大器是用电子管组成的，后来被晶体管分立元器件运算放大器取代。随着半导体集成工艺的发展，自从 20 世纪 60 年代初第一个集成运算放大器问世以来，才使运算放大器的应用远远超出模拟计算机的界限，在信号运算、信号处理、信号测量及波形产生等方面获得了广泛的应用。

13.4.1 集成运算放大器的结构与符号

1．集成运算放大器的组成

集成运算放大器的种类很多, 电路也各不相同, 但基本结构一般都是由以下 4 个部分组成，如图 13-13（a）所示。



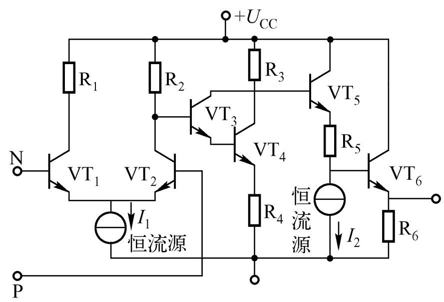


图 13-13　集成运算放大器的组成

输入级是提高运算放大器质量的关键部分，要求其输入电阻能减少零点漂移并抑制干扰信号。输入级大都采用差动放大。

中间级的主要作用是使集成运算放大器具有较强的放大能力，通常由多级共射（或共源）放大器构成，并经常采用复合管作为放大器。

输出级与负载相接，要求其输出电阻低，带负载能力强，能输出足够大的电压和电流，一般由互补对称电路或射极输出器构成。

偏置电路的作用是为上述各级电路提供稳定和合适的偏置电流，决定各级的静态工作点，一般由各种恒流源电路构成。

如图 13-13（b）所示为简单集成运算放大器的原理图。三极管 VT_1 和 VT_2 组成带恒流负载的差分放大器作为输入级。VT_3 和 VT_4 组成复合管，主要起电压放大作用，作为中间级。VT_5 和 VT_6 构成复合射极输出器，是输出级。

2．集成运算放大器的符号

集成运算放大器的符号如图 13-14 所示，图中“▷”表示放大器，三角形所指的方向为信号传输方向，“∞”表示开环增益极高。它有“＋”和“-”两个输入端。当在“＋”端输入信号 U_i 时，输出信号 U_o 与 U_i 的极性相同，故“＋”端称为同相端。当在“-”端输入信号 U_i 时，

输出信号 U_o 与 U_i 的极性相反，故“ - ”端称为反相端。

3．集成运算放大器的电压传输特性

集成运算放大器的输出电压与输入电压（即同相输入端与反相输入端之间的差值电压）之间的关系曲线称为电压传输特性。对于正、负两路电源供电的集成运算放大器，其电压传输特性如图 13-15 所示。

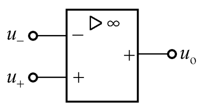


图 13-14　集成运算放大器的符号

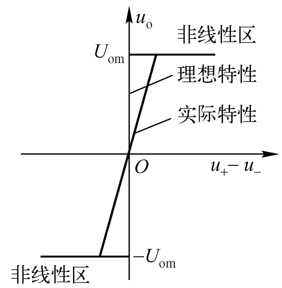


图 13-15　集成运算放大器的电压传输特性

曲线分线性区（图中斜线部分）和非线性区（图中斜线以外的部分）。在线性区，输出电压 u_o 等于 A_{uo}（U_+-U_-），其中 A_{uo} 为开环电压放大倍数。但在非线性区，u_o 等于$\pm U_{om}$（最大输出电压）。

由于外电路没有引入负反馈，集成运算放大器的开环增益非常高，只要加很微小的输入电压，输出电压就会达到最大值$\pm U_{om}$，所以集成运算放大器电压传输特性中的线性区非常窄。

4．集成运算放大器的工作特点

1）集成运算放大器的理想特性

在分析运算放大器时，为了便于分析和计算，一般可将它视为一个理想运算放大器。其主要条件如下。

（1）开环差模电压放大倍数 $A_{uo}\to\infty$；

（2）差模输入电阻 $r_{id}\to\infty$；

（3）输出电阻 $r_o\to 0$；

（4）共模抑制比 $K_{CMR}\to\infty$；

（5）输入偏置电流 $I_{B1}=I_{B2}=0$。

2）理想集成运算放大器线性区的特点

（1）因为理想运算放大电路的输入偏置电流为零，输入电阻为无穷大，该电路不会向外部电路索取任何电流，所以流入放大器反相输入端和同相输入端的电流为零。也就是说，集成运算放大电路是与电路相连接的，但输入电流又近似为零，相当于断开一样，故通常称为“虚断”。

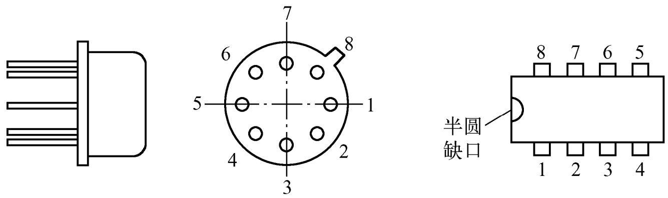
（2）因为开环差模电压放大倍数为无穷大，所以当输出电压为有限值时，差模输入电压 U_+-$U_-=U_o/A_{uo}=0$，即 $U_+=U_-$。也就是说，集成运算放大器两个输入端对地的电压总是相等的。二者不接地，但电位又总相等，相当于短路，通常称为“虚短”。如果同相输入端接地（或通过电阻接地），即 $U_+=0$，则反相输入端电位也为零，但又不接地，则称为“虚地”。

一般实际的集成运算放大器工作在线性区时，其参数很接近理想条件，因此工作在线性区的实际集成运算放大器，也基本上具备这两个特点。

13.4.2 集成运算放大器的引脚功能

1．集成运算放大器的封装形式、引脚排列

集成运算放大器的封装形式主要为金属圆壳封装及双列直插式封装，如图 13-16 所示。金属圆壳封装的引脚有 8、10、12 三种形式，双列直插型封装的引脚有 8、14、16 三种形式。



（a）金属圆壳　　（b）双列直插式

图 13-16　集成运算放大器外形

集成运算放大器的引脚除输入、输出端外，还有电源端，公共端（地端）、调零端、相位补偿端、外接偏置电阻端等。这些引脚虽未在电路符号上标出，但在实际使用时必须了解各引脚的功能及外接线的方式。

2．集成运算放大器引脚功能代表符号

表 13-1 列出了集成运算放大器引脚功能代表符号。

表 13-1　集成运算放大器引脚功能代表符号

符　　号	功　　能	符　　号	功　　能
IN_-	反相输入端	BI	偏置电流输入端
IN_+	同相输入端	C_X	外接电容端
OUT	输出端	C_R	外接电阻及电容的公共端
V_+	正电源输入端	OSC	振荡信号输出端
V_-	负电源输入端	NC	空闲的引线端（空脚）
V_S	表示供电电压	GND	接地端
COMP	补偿端	GNDS	信号接地端
OA	调零端	GNGD	功率接地端

13.4.3 基本集成运算放大器

集成运算放大器能完成比例、加减、积分与微分、对数与反对数以及乘除等运算，现将比例运算、加减运算介绍如下。

1．比例运算电路

将输入信号按比例放大的电路，称为比例运算放大电路。按输入信号加入不同的输入端的方式不同，可分为反相输入比例运算放大器和同相输入比例运算放大器。

1）反相输入比例运算电路

反相输入比例运算放大器的原理图如图 13-17 所示。输入信号 U_i 从反相端输入，所以 U_o 与 U_i 相位相反。输出电压经过 R_f 反馈到反相输入端，构成电压并联负反馈电路。因为输出信号与输入信号的相位相反，因此该电路也称为反相放大器。R_f 称为反馈电阻，R_1 称为输入电阻，

R′称为输入平衡电阻。选择参数时应使 $R'=R_1//R_f$，让集成运算放大器两个输入端的外接电阻相等，确保其处于平衡对称的工作状态。

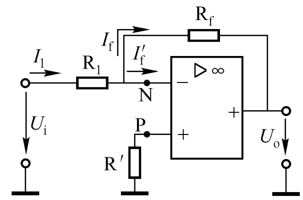


图 13-17　反相比例

运算电路

根据分析集成运算放大电路的两个重要特点（“虚短”、“虚断”）可知：

因为 $U_+=U_-=0$（因为 $U_+=0$，所以“虚地”），$I_+=I_-=0$

所以

$$I_i=\frac{U_i-U_N}{R_1}=\frac{U_i}{R_1}=I_f$$

$$U_o=-I_fR_f=-\frac{R_f}{R_1}U_i \tag{13-19}$$

即闭环电压放大倍数为

$$A_{uf}=\frac{U_o}{U_i}=-\frac{R_f}{R_1} \tag{13-20}$$

由式（13-19）可以看出 U_o 与 U_i 是比例关系，改变比例系数，即可改变 U_o 的数值。负号表示输出电压与输入电压极性相反，即该电路实现了对反相端输入信号的反相比例运算功能，故称为反相比例运算放大电路。

在反相输入运算放大器中，如果 $R_f=R_1$，则 $A_{uf}=-R_f/R_1=-1$，即输出电压与输入电压大小相等、相位相反，这种电路称为反相器。

【例 13-1】在如图 13-18 所示的电路中，设 $R_f=100\text{k}\Omega$，$R_1=10\text{k}\Omega$，$U_i=0.5\text{V}$。求运算放大电路的闭环电压放大倍数 A_{uf} 及输出电压 U_o。

【解】由式（13-20）可知

$$A_{uf}=\frac{U_o}{U_i}=-\frac{R_f}{R_1}=-\frac{100}{10}=-10$$

由式（13-20）可知

$$U_o=-\frac{R_f}{R_1}U_i=-10\times0.5=-5\text{（V）}$$

2）同相输入比例运算电路

同相输入比例运算放大器的原理图如图 13-18 所示。输入信号 U_i 经 R'加到同相输入端，输出信号队经 R_f 和 R_1 分压后反馈到反相输入端。这是一个电压串联负反馈电路。因为输出信号与输入信号的相位相同，所以该电路也称为同相放大器。为保持输入端平衡，使平衡电阻 $R'=R_1//R_f$，根据分析集成运算放大电路的两个重要特点（“虚短”、“虚断”）可知：

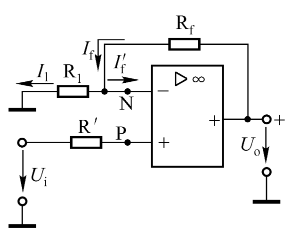


图 13-18　同相比例运算电路

因为 $U_+=U_-=U_i$（“虚短”，但不是“虚地”），$I_+=I_-=0$

所以 $U_p=U_i=U_N$

$$I_i=\frac{U_N}{R_1}$$

$$I_f=\frac{U_o-U_N}{R_f}=I_i$$

则
$$U_o=\left(1+\frac{R_f}{R_1}\right)U_i \tag{13-21}$$

即闭环电压放大倍数为

$$A_{uf}=\frac{U_o}{U_i}=1+\frac{R_f}{R_1} \tag{13-22}$$

由式（13-21）可以看出：U_o 与 U_i 是比例关系，改变比例系数，即改变 R_f/R_1，即可改变 U_o 的值，由于输入、输出电压的极性相同且有比例关系，故称为同相比例运算放大电路。

在同相输入运算放大器中，当 $R_f=0$ 或 $R_1=\infty$时，$A_{uf}=1+(R_f/R_1)=1$，即输出电压与输入电压大小相等，相位相同，这种电路称为电压跟随器。

【例 13-2】在如图 13-18 所示的电路中，设 $R_f=300\text{k}\Omega$，$R_1=20\text{k}\Omega$，$U_i=2.5\text{V}$。求运算放大电路的电压放大倍数 A_{uf} 及输出电压 U_o。

【解】由式（13-22）可知

$$A_{uf}=\frac{U_o}{U_i}=1+\frac{R_f}{R_1}=1+\frac{300}{20}=16$$

由式（13-21）可知

$$U_o=\left(1+\frac{R_f}{R_1}\right)U_i=16\times2.5=40\ (\text{V})$$

2．加法运算电路

加法运算又叫求和运算，在反相比例运算放大器的基础上增加若干个输入支路便组成了反相加法运算电路，也称为反相加法器，如图 13-19 所示。

根据分析集成运算放大电路的两个重要特点（“虚短”、“虚断”）可知

$$I_1=\frac{U_{i1}}{R_1},\quad I_2=\frac{U_{i2}}{R_2},\quad I_3=\frac{U_{i3}}{R_3}$$

$$I_f=I_1+I_2+I_3$$

又因为反相输入端为虚地，故有

$$U_o=-I_fR_f$$

即
$$U_o=-\left(\frac{U_{i1}}{R_1}+\frac{U_{i2}}{R_2}+\frac{U_{i3}}{R_3}\right)R_f \tag{13-23}$$

从式（13-23）可以看出，电路实现了反相加法运算，式中的负号表明输出电压与输入电压的相位相反。如果在如图 13-19 所示的输出端再接一级反相器，可消去负号，从而实现常规的加法运算。为保持输入端平衡，则使得平衡电阻 $R'=R_1//R_2//R_3//R_f$。

3．减法运算电路

减法运算电路是实现若干个输入信号相减功能的电路，常用差动输入方式来实现，如图 13-20 所示。输入信号 U_{i1}、U_{i2} 分别加到运算放大器的反相输入端和同相输入端上。

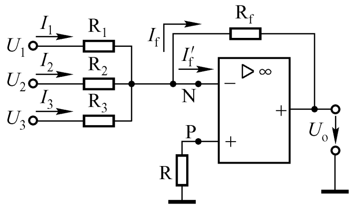


图 13-19　反相加法运算电路

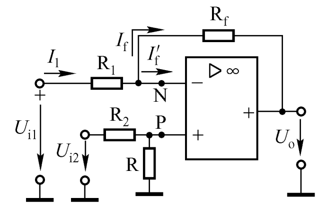


图 13-20　差动减法运算电路

下面利用叠加原理来进行分析。

当 U_{i1} 单独作用时

$$U_{o1}=-\frac{R_f}{R_1}U_{i1} \tag{13-24}$$

当 U_{i2} 单独作用时

$$U_{o2}=\left(1+\frac{R_f}{R_1}\right)U_+=\left(1+\frac{R_f}{R_1}\right)\left(\frac{R}{R+R_2}\right)U_{i2} \tag{13-25}$$

所以

$$U_o=U_{o1}+U_{o2}=-\frac{R_f}{R_1}U_{i1}+\left(1+\frac{R_f}{R_1}\right)\left(\frac{R}{R+R_2}\right)U_{i2} \tag{13-26}$$

当 $R_1=R_2$，$R_f=R$ 时，则

$$U_o=\frac{R_f}{R_1}（U_{i2}-U_{i1}） \tag{13-27}$$

此时，闭环电压放大倍数为

$$A_{uf}=\frac{R_f}{R_1} \tag{13-28}$$

由式（13-27）可知，输出电压正比于两个输入电压之差。这种运算电路实现了差值运算，因此又称为差动输入比例运算电路。

如果取 $R_1=R_f$，则

$$U_o=U_{i2}-U_{i1} \tag{13-29}$$

这时，此电路就称为减法运算电路。由于信号电压同时从反相输入端和同相输入端输入，电路存在共模电压，为了保证运算精度，要选用共模抑制比较高的集成运算放大电路。

【例 13-3】在如图 13-20 所示的电路中，设 $R_f=R=300\text{k}\Omega$，$R_1=R_2=20\text{k}\Omega$，$U_{i1}=2.5\text{V}$，$U_{i2}=2.3\text{V}$。求运算放大电路的电压放大倍数 A_{uf} 及输出电压 u_o。

【解】由式（13-28）可知

$$A_{uf}=\frac{R_f}{R_1}=\frac{300}{20}=15$$

由式（13-27）可得输出电压

$$U_o=\frac{R_f}{R_1}（U_{i2}-U_{i1}）=15\times（2.3-2.5）=-3（\text{V}）$$

13.5 技能训练 16　共发射极基本放大电路的安装与调试

13.5.1 技能训练目标

（1）加深对共发射极放大电路原理的理解。
（2）学会使用电子仪器测量和调整放大电路。
（3）了解负载对电压放大倍数的影响。
（4）观察静态工作点对输出电压波形的影响。

13.5.2 技能训练仪器与器件

（1）电子装配工具套件。
（2）万用表；电子电压表。
（3）双踪示波器；函数信号发生器。
（4）万能电路板；共发射极放大电路实训器材套件；电烙铁；连接导线；焊锡。

13.5.3 技能训练内容与步骤

1．按图 13-21 所示连接电路

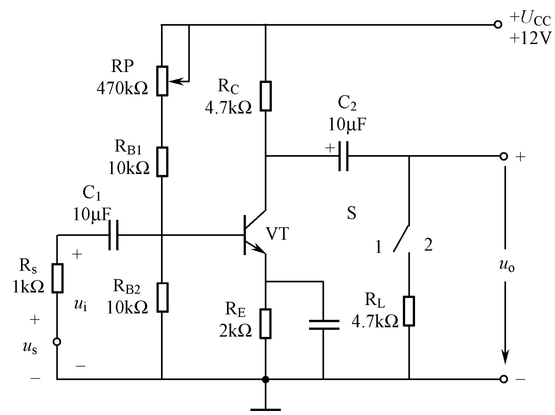


图 13-21　共发射极放大电路

2．测量静态工作点

接通直流电源前，先将 RP 调至最大，函数信号发生器输出旋钮旋至零。接通+12V 电源，调节 RP，使得 $I_C = 2\text{mA}$（使 $U_{CE} = 2\text{V}$），用万用表的直流电压挡来测量 U_B、U_E、U_C 的值，并将结果记入表 13-2 中。

表 13-2　测量静态工作点

测量值（V）			计算值（V、mA）		
U_B	U_E	U_C	U_{BE}	U_{CE}	I_C

3．测量电压放大倍数

用函数信号发生器在电路输入端加入频率为 1kHz 的正弦波信号，调节信号发生器的输出旋钮，使 u_i=5mV。同时将双踪示波器接在放大器的输出端，调整输入信号的幅度和改变 RP 的大小，使输出端得到的波形最大不失真，用万用表测量上述两种情况下的 u_o 值，并用双踪示波器观察 u_o 和 u_i 的相位关系，将结果记入表 13-3 中。

表 13-3　测量电压放大倍数

R_C（kΩ）	R_L（kΩ）	u_o（V）	A_u（计算）

4．观察静态工作点对输出电压波形的影响

设 R_C = 4.7kΩ，R_L = 4.7 kΩ，u_i = 0，调节 RP 使 I_C = 2mA，测出 U_{CE} 值，再逐步加大输入信号，使输出电压 u_o 足够大但不失真。然后保持输入信号不变，分别增大和减小 RP 使波形出现失真，绘出 u_o 的波形，并测出失真情况下 I_C 和 U_{CE} 值，记入表 13-4 中。每次测 I_C 和 U_{CE} 值时都要将信号源的输出旋钮旋至零。

表 13-4　静态工作点对输出电压波形的影响

I_C（mA）	U_{CE}（V）	u_o 波形	失真情况	三极管工作状态

5．测量输入电阻和输出电阻

（1）输入电阻 R_i 的测量。在输入端串接一个 1kΩ电阻，测量 u_s 与 u_i 即可计算 R_i，并将计算结果填入表 13-5 中。

（2）输出电阻 R_o 的测量。在输出端接入 4.7 kΩ的负载电阻，测量有负载和空载时的 u_o 值（接示波器监视），即可计算 R_o，并将计算结果填入表 13-5 中。

表 13-5　测量输入电阻和输出电阻

输 入 电 阻				输 出 电 阻			
实测（mV）		测算（Ω）	估算（Ω）	实测（mV）		测算（Ω）	估算（kΩ）
u_s	u_i	R_i	R_i	u_o（R_L=∞）	u_o（R_L=4.7kΩ）	R_o	R_o

13.5.4　注意事项

（1）电阻器采用水平安装方式，高度要求为电阻体离开万能电路板 5mm，色标法电阻的色环标志顺序方向一致；电容器、三极管采用垂直安装方式，高度要求为电容器的底部离万能电路板 8mm；微调电位器应贴紧万能电路板安装。

（2）所有焊点均采用直脚焊，焊接完成后剪去多余引脚，留头在焊面以上 0.5～1mm，而且不能损伤焊接面。

（3）万能电路板布线应正确、平直，转角处成直角，焊接可靠，无漏焊、短路现象。

（4）用多股软导线连接电源（12V），并加以固定，注意正、负极性不要接错。

13.5.5　创新能力的启发和培养

怎样设计放大电路？

提示：根据具体采用的三极管的特性，选择设计合适的静态工作点，使得放大器工作在放大区域。

13.5.6　思考问题

（1）要使放大电路能够基本不失真地进行放大信号，必须具备哪些条件？

（2）放大电路为什么要设置合适的静态工作点？

（3）放大电路的基本工作状态有哪几种？分别运用在什么场合？

13.5.7　实训要求

（1）认真测量记录数据，并进行分析。

（2）温习焊接步骤，熟练焊接技能。

（3）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 13

1. 共发射极放大电路有哪些特点？
2. 引入什么样的反馈能够有利于放大器的稳定性？
3. 功率放大器与普通放大器有什么区别？
4. 正弦波振荡器由哪三部分组成？分别具有什么作用？
5. 怎样理解运算放大器的“虚断”和“虚短”？

教学微视频

扫一扫

第 14 章　数字电子技术基础

【本章学习目标】

1. 了解数字信号的特点。
2. 熟悉二进制、十进制数的表示方法，掌握它们之间的转换方法。
3. 了解三种基本逻辑门电路，以及由三种基本逻辑门电路组成的复合逻辑门电路的特点。
4. 了解逻辑电路图、真值表与逻辑函数之间的关系。

【教学目标】

1. 知识目标：了解数字电路的基本概念，理解基本逻辑门电路的原理及应用。
2. 能力目标：通过理论知识的学习和应用，培养综合运用能力。

【教学重点】

基本逻辑门电路的内涵及应用。

【教学难点】

基本逻辑门电路的电路图、真值表与逻辑函数之间的关系。

【教学方法】

读书指导法、分析法、实验法、练习法。

14.1 概述

14.1.1 数字信号和数字电路

数字量是物理量的一种。它们的变化在时间上和数量上都是离散的；也就是说，它们的变化在时间上是不连续的，总是发生在一系列离散的瞬间；同时，它们的数值大小和每次的增减变化都是某一个最小数量单位的整数倍，而小于这个最小数量单位的数值没有任何物理意义，这一类物理量称为数字量。把表示数字量的信号称为数字信号，并且把工作在数字信号下的电子电路称为数字电路。

例如，用电子电路记录从自动生产线上通过的产品数目时，每送出一个产品，便给电子电路一个信号，使之计 1，而平时没有产品送出时加给电子电路的信号是 0，所以不计数。可见，产品数目这个信号无论在时间上还是在数量上都是不连续的，因此它是一个数字信号。最小的数量单位就是 1 个。

14.1.2 数字电路的特点

数字电路中使用的基本器件是数字集成电路，数字集成电路的技术特点是以实现逻辑功能为目标。一个数字电路能否满足设计要求，主要取决于数字集成电路的电路功能与技术参数指标。

数字电路的基本技术特性与电路工艺有关。只有了解了数字电路的基本技术特性，才能设

计和描述一个数字逻辑电路系统，才能正确确定数字电子系统所需要的电路器件。因此，数字电路的基本技术特性，是数字电子系统设计、分析和调试技术的基础，也是数字电路系统的基本描述语言。数字电路主要有以下特点：

（1）电路结构简单，容易制造，便于集成，系列化生产，成本低廉，使用方便。

（2）由数字电路组成的数字系统，工作准确可靠，精度高。

（3）不仅能完成数值运算，还可以进行逻辑运算与判断，在控制系统中是不可少的，因此数字电路又称为“数字逻辑电路”。

14.1.3　数的表示方法

数制是数的表示方式，常用的数制有二进制数和十进制数两种。

1．十进制数

（1）基本数码：0，1，2，3，4，5，6，7，8，9。

（2）进位原则：逢十进一，即 $9+1=10$。

对于十进制的任一正整数 A，可以写成以 10 为底的幂次方求和的展开形式，即 $A=b_{n-1}10^{n-1}+b_{n-2}\times10^{n-2}+\cdots+b_1\times10^1+b_0\times10^0$，式中，$n$ 是十进制数的位数（$n=1, 2, 3, \cdots$），10_{n-1}，10_{n-2}，$\cdots$，10^1，10^0 是各位数的“权”。

由上可知，十进制数是由数码的值和位权来表示的。

2．二进制数

（1）基本数码：0，1。

（2）进位原则：逢二进一，即 $(1+1)_2=(10)_2$。

任何一个二进制数 P，可以写成（P）$_2=b_{n-1}\times2^{n-1}+b_{n-2}\times2^{n-2}+\cdots+b_1\times2^1+b_0\times2^0$。式中，$n$ 是二进制数的位数，b_{n-1}，b_{n-2}，$\cdots$，b_1，b_0，2^{n-1}，2^{n-2}，$\cdots$，2^1，2^0 是各位的位权。

例如，$(1011)_2=1\times2^3+0\times2^2+1\times2^1+1\times2^0$。

3．二进制数化为十进制数

原则：二进制数的每位数码乘以它所在数位的“权”，再相加起来，即可得到等值的十进制数。这种方法被称为“乘权相加法”。

【例 14-1】将二进制数 $(1011)_2$ 化为十进制数。

【解】$(1011)_2=(1\times2^3+0\times2^2+1\times2^1+1\times2^0)_{10}=(2^3+0+2^1+1)_{10}=(11)_{10}$

4．十进制数化为二进制数

原则：把十进制数不断地用 2 除，并依次记下余数，一直除到商为零。然后把全部的余数，按相反的次序排列起来，就是等值的二进制数。

这种方法被称为“除 2 取余倒记法”。

【例 14-2】将十进制数 $(37)_{10}$ 化为二进制数。

【解】

除数	被除数/商		余数
2	37	……	1
2	18	……	0
2	9	……	1
2	4	……	0
2	2	……	0
2	1	……	1
	0		

（自下而上读取）

所以$(37)_{10}=(100101)_2$

14.2 逻辑门电路

14.2.1 与逻辑和与门电路

1．与逻辑

当决定一件事的所有条件都满足时，该件事才会发生，这种因果逻辑关系称为“与”逻辑。如图 14-1 所示，只有当开关 K_1 和 K_2 都闭合时，灯才会亮。对于灯 L，开关 K_1 和开关 K_2 闭合是与逻辑关系。

2．与门电路

能实现与逻辑功能的电路称为与门电路。如图 14-2（a）所示，是由两个二极管组成的与门电路。A、B 为两个输入端，Y 为输出端。设 U_{CC} 为 9V，A、B 输入高低电平，分别为 $U_H=3V$，$U_L=0V$，二极管 VD_1 和 VD_2 为理想二极管。由图可知，A、B 中只要有一个是低电平 0V，则必有一个二极管是导通的，使 Y 为 0V。A、B 同时为低电平 0V 时，输出 Y 为 0V。只有当 A、B 同时为高电平 3V 时，Y 为高电平 3V。与逻辑符号如图 14-2（b）所示。图中 A、B 表示输入逻辑变量，Y 表示输出逻辑变量。与逻辑表达式为 Y＝A · B。与门的输入端可以不止两个，但逻辑关系还是一样的。与门的逻辑关系，除了用逻辑函数表达式表示外，还可以用真值表来表示。如表 14-1 所示是与门的真值表。所谓真值表是指逻辑门电路输出状态和输入状态逻辑对应关系的表格。从真值表中可以看出，与门电路的逻辑功能为“有 0 出 0，全 1 出 1”。

表 14-1　与门的真值表

输　入		输　出
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

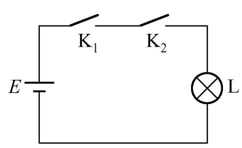
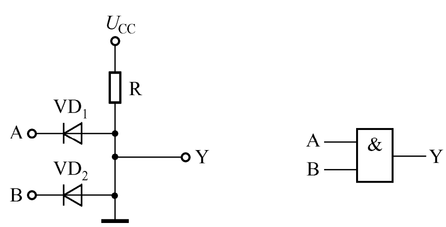


图 14-1　与逻辑图



（a）二极管与门电路　（b）与逻辑符号

图 14-2　与逻辑功能的电路

14.2.2 或逻辑和或门电路

1．或逻辑

当决定某一事件的几个条件中，至少有一个条件满足，该事件就会发生，这种因果关系称为“或”逻辑。用如图 14-3 所示的电路，来说明或逻辑关系。图中电路由两个并联开关 K_1、K_2 和灯泡 L 组成。

由图中可知，只要两个开关中有一个（或两个）接通，灯就会亮；当开关全部断开时，灯

才不亮。

2．或门电路

能实现或逻辑关系的电路称为或门电路。如图 14-4 所示是由二极管和电阻组成的或门电路。图中 A、B 是两个输入变量，Y 是输出变量。

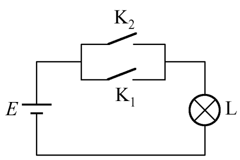


图 14-3　或逻辑关系图

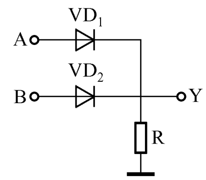


图 14-4　二极管或门电路图

由图可知，假设二极管 VD_1 和 VD_2 为理想二极管，只要 A、B 中有一个是高电平，输出 Y 就是高电平。只有当 A、B 同时为低电平时，输出才是低电平。

3．或逻辑的函数表达式为

$$Y=A+B$$

或逻辑的真值表如表 14-2 所示。

或逻辑符号如图 14-5 所示。

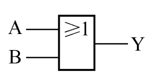


图 14-5　或逻辑符号

表 14-2　或逻辑的真值表

输　入		输　出
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

14.2.3　非逻辑和非门电路

1．非逻辑

当一个事件的结果和条件总是相反时，这种逻辑关系称为“非”逻辑。在如图 14-6 所示电路中，只有当开关 K 断开时，灯才会亮；而当开关 K 闭合时，灯就会因短路而熄灭。

2．非门

实现非逻辑功能的电路叫非门，非门的逻辑符号如图 14-7 所示。

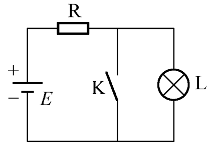


图 14-6　非逻辑的电路

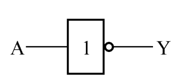


图 14-7　非门的逻辑符号

非门的逻辑表达式为：$Y=\overline{A}$。

式中，Y 为逻辑函数，A 为输入逻辑变量。

非门的真值表如表 14-3 所示。

表 14-3　非门的真值表

输　入	输　出
A	Y
0	1
1	0

14.2.4　复合逻辑门

日常实用中，把与门、或门和非门组合来使用，称为组合逻辑门电路。

1．与非门

在与门后面接一个非门就构成与非门，如图 14-8 所示。

与非门的输入与输出的逻辑关系如表 14-4 所示。

从真值表中不难看出，与非门的逻辑功能是：有 0 出 1，全 1 出 0。

逻辑表达式为：$Y=\overline{A\cdot B}$。

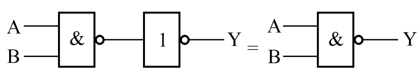


图 14-8　与非门

表 14-4　与非门真值表

A	B	A · B	$\overline{A\cdot B}$
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

2．或非门

在或门的后面接一个非门，就构成或非门，如图 14-9 所示。

或非门的输入与输出的逻辑关系如表 14-5 所示。

表 14-5　或非门真值表

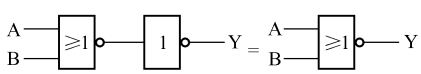


图 14-9　或非门

A	B	A+B	$\overline{A+B}$
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

由或非门真值表可以看出，或非门的逻辑功能是：有 1 出 0，全 0 出 1。

或非门的逻辑表达式为：$Y=\overline{A+B}$。

3．与或非门

将两个（或两个以上）与门的输出端接到一个或门的输入端，就构成一个与或门，在其后再接一个非门，就组成了一个与或非门，如图 14-10 所示。与或非门的逻辑符号如图 14-11 所示。

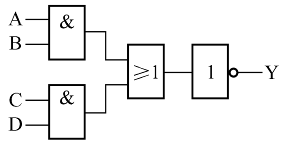


图 14-10　与或非门逻辑图

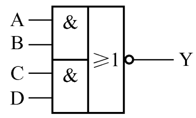


图 14-11　与或非门的逻辑符号

与或非门的真值表如表 14-6 所示。

表 14-6　与或非门的真值表

A	B	C	D	Y
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

由逻辑符号可以看出，与或非门的逻辑关系是：输入端分组先与，然后各组再或，最后再非。

从真值表中可以看出，与或非门的逻辑功能为：当输入端中任何一组全为 1 时，输出即为 0，只有各组输入都至少有一个为 0 时，输出才能为 1。

与或非门的逻辑表达式为：$Y = \overline{AB + CD}$。

14.3 集成门电路

14.3.1 TTL 集成与非门电路

TTL 集成与非门电路是由晶体管组成的集成逻辑门电路，与前面二极管、三极管等分立元器件组成的门电路相比，具有结构简单、工作稳定、速度快等优点。利用它可以组成各种门电路、计数器、编码器、译码器等逻辑部件，它广泛应用于计算机、遥控和数字通信等设备中。

1．电路组成

图 14-12 所示为国产 T1000 系列的 TTL 与非门的典型电路。该电路由输入级、中间级和输出级三部分组成。

（1）输入级由多发射极晶体管 VT_1 和电阻 R_1 组成。多发射极晶体管的基极与每个发射极之间都有一个 PN 结，基极和集电极之间也有一个 PN 结，如果用二极管代替这些 PN 结，如图 14-13 所示，不难看出，多发射极晶体管 VT_1 的两个发射结和电阻 R_1，组成了与门电路，集电极则起电平转移的作用。多发射极晶体管 VT_1 组成的与门电路提高了电路的开关速度。

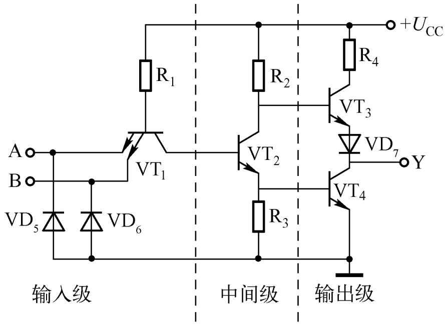


图 14-12　TTL 与非门的典型电路

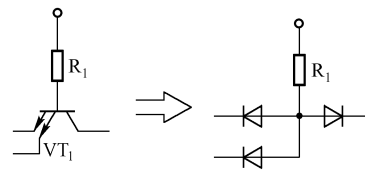


图 14-13　多发射极晶体管的等效电路

（2）中间级由 VT_2 和 R_2、R_3 组成倒相级。由 VT_2 管的集电极和发射极分别输出两个相位相反的信号，驱动 VT_3 和 VT_4。

（3）输出级由 VT_3、VT_4、VD_7 和 R_4 组成。

2．工作原理

（1）当输入端均为高电平（约 3.6V）时，与门输出为高电平，电流由电源经 R_1、VT_1、VT_2、VT_4 到地，VT_2、VT_4 工作在饱和状态，由于 VT_2 饱和，它的集电极电位 $U_{C2}=U_{CE2}+U_{BE4}\approx0.3+0.7=1V$，此值不能使 V_3 的发射极和二极管 VD_7 导通，所以 VT_3、VD_7 截止，输出低电平（约 0.3V）。

（2）当输入端有一个或几个为低电平（约 0.3V）时，与门输出低电平，使 VT_2、VT_4 截止，电流由电源、R_2、VT_3、VD_7、负载到地，使 VT_3、VD_7 导通，输出高电平（约 3.6V）。

综上所述，如图 14-12 所示的 TTL 电路只要有一个输入端为低电平，输出即为高电平；只有当所有的输入端全为高电平时，输出才是低电平，实现了“与非”功能，即 $Y=\overline{A \cdot B}$。

输入端接有二极管 VD_5 和 VD_6，其作用是用来限制输入端出现的负极性干扰脉冲，保护多发射极晶体管。

3．主要参数

（1）输出高电平 U_{OH}：指有一个（或几个）输入端为标准低电平时的输出电平值。

（2）输出低电平 U_{OL}：指输入信号为全部标准高电平时输出的低电平值。

（3）开门电平 U_{ON}：在额定负载条件下，输出为额定低电平时所允许输入高电平的最小值，一般取 $U_{ON}\leq1.8V$。

（4）关门电平 U_{OFF}：在空载条件下，保证输出为额定高电平时所允许输入低电平的最大值，一般取 $U_{OFF}\geq0.8V$。

TTL 电路要保证输出高电平，输入信号必须小于 U_{OFF}；而要保证输出低电平，输入信号必须大于 U_{ON}。

（5）扇出系数 N_o：该与非门能驱动同类与非门的最大数目称为扇出系数，又称负载能力。

14.3.2　CMOS 集成门电路

CMOS 门电路由绝缘栅场效应管为基本元器件组成，CMOS 场效应管有 PMOS 和 NMOS 两类。CMOS 门电路是由 PMOS 和 NMOS 组成的互补对称型逻辑门电路。

CMOS 集成电路与 TTL 集成电路相比，具有集成度高、功耗低、抗干扰能力强、扇出系数大等优点，其应用领域十分广泛。下面介绍几种 CMOS 门电路。

1．CMOS 非门电路

1）电路组成

如图 14-14 所示是 CMOS 非门的电路及其符号。图中 V_N 是增强型 NMOS 管，作为驱动管（驱动负载的晶体管称驱动管）；V_P 是增强型 PMOS 管，作为负载管（作为负载的晶体管称负载管）。两管的栅极相连作为输入端，两管的漏极相连作为输出端。V_N 的源极接地，V_P 的源极接电源正极。

2）工作原理

当输入端 A 为低电平时，V_N 截止，V_P 导通，输出高电平，其值近似为电源电压。

当输入端 A 为高电平时，情况与上述相反。此时，V_N 导通，V_p 截止，输出低电平，实现了非逻辑的功能。其逻辑表达式为

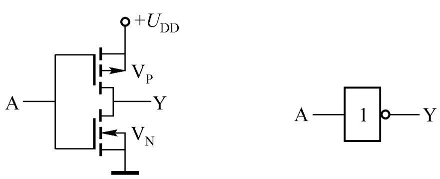
$$Y = \overline{A}$$

由上面分析可知，CMOS 非门电路输出幅度近似为 U_{DD}。电路工作时，两管轮流导通，由于截止管的电阻极大，可以认为电源 U_{DD} 与地之间基本上无电流通过，所以器件本身的功耗极低（微瓦以下）。

2．CMOS 与非门电路

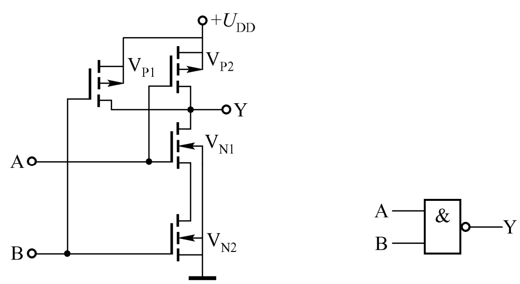
1）电路组成

如图 14-15 所示为两输入端与非门电路及其符号，NMOS 管 V_{N1}、V_{N2} 串联作为驱动管；PMOS 管 V_{P1}、V_{P2} 并联作为负载管。每个输入端连到一个 N 沟道和一个 P 沟道的 MOS 管的栅极。



（a）电路　（b）逻辑符号

图 14-14　CMOS 非门电路及符号



（a）电路　（b）逻辑符号

图 14-15　CMOS 与非门电路及符号

2）工作原理

当输入端 A、B 为低电平时，V_{N1}、V_{N2} 总有一个或两个截止，V_{P1}、V_{P2} 总有一个或两个导通，输出为高电平。

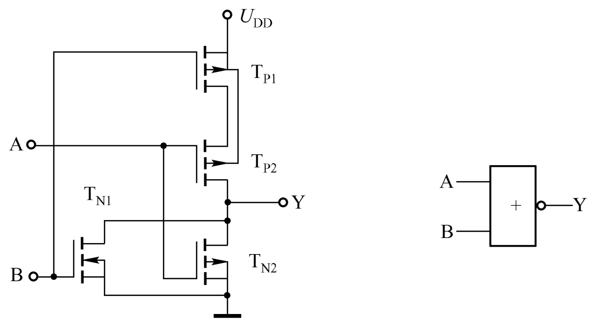
当输入端 A、B 全为高电平时，V_{N1}、V_{N2} 导通，V_{P1}、V_{P2} 截止，输出为低电平。可见，该电路具有与非功能，其逻辑表达式为

$$Y = \overline{AB}$$

3．CMOS 或非门电路

1）电路组成

如图 14-16 所示为两输入端 CMOS 或非门电路及其符号。NMOS 管 V_{N1}、V_{N2} 并联作为驱动管，PMOS 管 V_{P1}、V_{P2} 串联作为负载管。



（a）电路　　（b）逻辑符号

图 14-16　CMOS 或非门电路及符号

2）工作原理

当输入端 A、B 中有高电平时，V_{N1}、V_{N2} 总有一个或两个管子导通，V_{P1}、V_{P2} 总有一个或两个管子截止，输出低电平。

当输入端 A、B 全为低电平时，V_{N1}、V_{N2} 均截止，V_{P1}、V_{P2} 均导通，输出高电平。可见，该电路具有或非功能，其逻辑表达式为

$$Y=\overline{A+B}$$

14.4　技能训练 17　门电路逻辑功能及测试

14.4.1　技能训练目标

（1）熟悉门电路逻辑功能。
（2）熟悉示波器使用方法。
（3）学习用门电路组合实现逻辑功能。

14.4.2　技能训练仪器与器件

（1）双踪示波器。
（2）74LS00（二输入端四与非门）2 片。
（3）74LS20（四输入端双与非门）1 片。
（4）74LS86（二输入端四异或门）1 片。
（5）74LS04（六反相器）1 片。

14.4.3　技能训练内容

实验前检查实验箱电源是否正常。然后选择实验用的集成电路，按自己设计的实验电路图接好连线，特别注意 V_{CC} 及地线不能接错。线接好后经实验指导教师检查无误方可通电实验。

1．测试与非门电路逻辑功能

（1）选用四输入端双与非门 74LS20 一片（其外部引脚如图 14-17 所示）插入实验板，输入端接 S1～S4（电平开关输入插口），输出端接电平显示发光二极管（D1～D8 任意一个），实验电路自拟。

（2）将电平开关按表 14-7 置位，分别测出电压及逻辑状态。

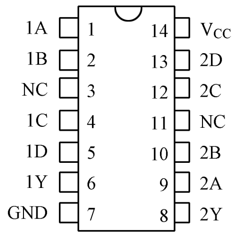


图 14-17　74LS20 外部引脚图

表 14-7　测试 74LS20 的逻辑状态功能

输　入				输　出	
A	B	C	D	Y	电压（V）
H	H	H	H		
L	H	H	H		
L	L	H	H		
L	L	L	H		
L	L	L	L		

2．异或门逻辑功能测试

（1）选二输入端四异或门电路 74LS86 一片（其外部引脚如图 14-18 所示），输入端 1、2、4、5 接电平开关，输出端 A 、B 、Y 接电平显示发光二极管。

（2）将电平开关按表 14-8 置位，将结果填入表中。

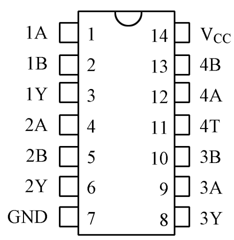


图 14-18　74LS86 外部引脚图

表 14-8　测试 74LS86 的逻辑功能

输　入				输　出			
1	2	4	5	A	B	Y	Y 电压（V）
L	L	L	L				
H	L	L	L				
H	H	L	L				
H	H	H	L				
H	H	H	H				
L	H	L	H				

3．逻辑电路的逻辑关系

（1）选用二输入端四与非门 74LS00 一片（其外部引脚如图 14-19 所示），插入实验板，实验电路自拟。将输入输出逻辑关系分别填入表 14-9 中。

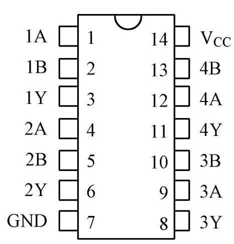


图 14-19　74LS00 外部引脚图

表 14-9　逻辑电路的逻辑关系

输　入		输　出	
A	B	Y	Y 电压（V）
L	L		
L	H		
H	L		
H	H		

（2）写出上面电路的逻辑表达式。

4．利用与非门控制输出

选用二输入端四与非门 74LS00 一片，插入实验板，输入接任一电平开关，实验电路自拟。用示波器观察 S 对输出脉冲的控制作用。

14.4.4 注意事项

（1）电子技术综合实验箱数字部分的 5V 电源由自身实验板左侧中部的 5V 电源提供。接通电源前，应检查一下电源电压值和极性是否正确。

（2）连接线路时应断电接线以免损坏芯片。

（3）插、拔连线时，一定拿住插头，轻插轻拔。不要用力拉导线以防插头线损坏。

（4）连接线路前，一定要事先查好芯片的管脚排列，不要随意乱插。芯片不要随意拔插。需要更换芯片时，应断电进行。

（5）实验箱板面上不允许放多余的导线，以免短路或损坏设备。

14.4.5 创新能力的启发和培养

试用门电路搭建逻辑判断电路。

提示：找几个逻辑表达式用若干与非门组合实现逻辑功能。

14.4.6 思考问题

（1）若集成电路芯片引脚插错了，通电会发生什么情况？

（2）门电路输入单脉冲和序列脉冲时，用示波器观察输出信号会发生什么变化？

（3）门电路的组合实现逻辑功能的作用有哪些？

14.4.7 实训要求

（1）测量和记录上面几种门电路的数据。

（2）回答思考问题。

（3）总结本次实训的认识、收获和建议。

14.5 技能训练 18 集成逻辑电路的测试

14.5.1 技能训练目标

（1）认识集成电路的触发器器件。

（2）学习逻辑功能的测试方法。

（3）用 D 触发器搭建一个四人用的智力竞赛抢答装置。

（4）了解简单数字系统实验、调试及故障排除的技能。

14.5.2 技能训练仪器与器件

（1）电子技术综合实验箱。

（2）集成电路 74LS175、74LS20、74LS74、74LS00 各一片。

（3）数字万用表 DT 9205。

（4）双踪示波器。

14.5.3　技能训练内容与步骤

（1）如图 14-20 所示为供四个人用的智力竞赛抢答装置线路，用以判断抢答优先权。

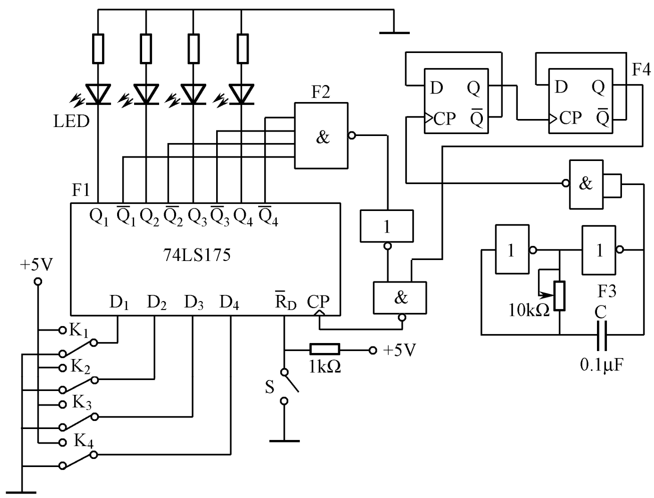


图 14-20　四人用的智力竞赛抢答装置原理图

图 14-20 中的 F1 为四 D 触发器 74LS175，它具有公共置 0 端和公共 CP 端；F2 为双四输入与非门 74LS20；F3 是由 74LS00 组成的多谐振荡器；F4 是由 74LS74 组成的四分频电路，F3、F4 组成抢答电路中的 CP 时钟脉冲源。抢答开始时，由主持人清除信号，按下复位开关 S，74LS175 的输出 Q1～Q4 全为 0，所有发光二极管 LED 均熄灭。当主持人宣布“ 抢答开始 ”后，首先做出判断的参赛者立即按下开关，对应的发光二极管点亮，同时通过与非门 F2 送出信号锁住其余三个抢答者的电路，不再接受其他信号，直至主持人再次清除信号为止。

（2）按图 14-20 所示电路接线，抢答器 5 个开关接实验装置上的逻辑开关，发光二极管接逻辑电平显示器。

（3）断开抢答器电路中的 CP 脉冲源电路，单独对多谐振荡器 F3 及分频器 F4 进行调试，调整多谐振荡器 10kΩ的电位器，使输出脉冲频率约为 4kHz，观察 F3 及 F4 的输出波形并测试其频率。

（4）测试抢答器电路的功能。

接通＋5V 电源，CP 端接实验装置上的连续脉冲源，频率为 1kHz。

（1）抢答开始前，开关 K_1、K_2、K_3、K_4 均置“ 0 ”。准备抢答时，将开关 S 置“ 0 ”，发光二极管全熄灭，再将 S 置“ 1 ”。抢答开始：K_1、K_2、K_3、K_4 某一开关置“ 1 ”，观察发光二极管的亮灭情况是否改变。

（2）重复（1）的内容，改变 K_1、K_2、K_3、K_4 任一开关状态，观察抢答器的工作情况。

（3）整体调试：断开实验装置上的连续脉冲源，接入 F3 及 F4，再进行实验。

14.5.4　注意事项

（1）连接中注意电源端和接地端的连线，电源极性绝对不能接反。

（2）接插集成芯片时，必须关闭电源；要认清定位标识，不得插反！

（3）注意各触发器的初态清零。

（4）注意输出波形触发沿的位置和信号周期。

14.5.5 创新能力的启发和培养

怎样设计数字电子秒表电路？

提示：学习数字电路中基本 RS 触发器，单稳态触发器，时钟发生器及计数器的综合运用，查找数字电子秒表电路的组合。

14.5.6 思考问题

（1）四人用智力竞赛抢答电路要完成哪些功能？

（2）试分析四人用智力竞赛抢答电路的工作原理。

（3）四人用智力竞赛抢答电路中的 F3、F4 电路能否用其他电路代替？

14.5.7 实训要求

（1）叙述 F1、F2、F3、F4 各部分电路的作用。

（2）回答思考问题，总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 14

1．什么是数字电路？

2．数字电路是怎样表示二进制数的？

3．逻辑电路的分析可以采用哪些方法？

4．TTL 集成与非门电路是由什么元器件组成的？有何特点？

5．CMOS 门电路是什么样的电路？与 TTL 集成电路相比具有哪些优点？

教学微视频

扫一扫

第 15 章　组合逻辑电路和时序逻辑电路

【本章学习目标】

1. 了解组合逻辑电路的种类。
2. 理解组合逻辑电路的读图方法和步骤。
3. 了解组合逻辑电路及逻辑部件的特点。
4. 了解常见组合逻辑电路和时序逻辑电路的基本功能。
5. 了解常见组合逻辑电路和时序逻辑电路的引脚功能，会根据真值表正确使用。

【教学目标】

1. 知识目标：了解组合逻辑电路的基本概念，理解组合逻辑电路的原理及应用；
2. 能力目标：通过理论知识的学习和应用，培养综合运用能力。

【教学重点】

常见组合逻辑电路的分析。

【教学难点】

常见组合逻辑电路真值表的分析。

【教学方法】

读书指导法、分析法、演示法、练习法。

15.1 组合逻辑电路

15.1.1 常见的组合逻辑电路

根据逻辑功能的不同特点，可以把数字电路分成两大类：一类称为组合逻辑电路，另一类称为时序逻辑电路。

在组合逻辑电路中，任意时刻的输出仅仅取决于该时刻的输入，与电路原来的状态无关。这就是组合逻辑电路在逻辑功能上的共同特点。

根据这个特点不难想到，既然组合逻辑电路的输出与电路的历史状况无关，那么电路中就不能包含存储单元。这就是组合逻辑电路在电路结构上的共同特点。

在生活生产中，人们遇到的逻辑问题层出不穷，因而为解决这些逻辑问题而设计的逻辑电路也不胜枚举。其中有些逻辑电路经常、大量地出现在各种数字系统中。

1. 编码器

将输入的每一个高、低电平信号编成一个对应的二进制代码。

2. 译码器

将输入的每一个二进制代码译成对应的输出高、低电平信号。

3．数据选择器

在数字信号的传输过程中，将某一个数据从一组输入数据中挑选出来。

4．加法器

两个二进制数之间的算术运算无论是加、减还是乘、除，目前在数字计算机中都是化作若干步加法运算进行的。因此，加法器是构成算术运算器的基本单元。

5．数值比较器

在一些数字系统中经常要求比较两个数字的大小，为完成这一功能所设计的各种逻辑电路统称为数值比较器。

15.1.2 组合逻辑电路的读图方法和步骤

组合逻辑电路的读图方法和步骤为：

（1）根据所给定的组合逻辑电路图，写出逻辑函数表达式。

（2）将表达式化简，以得到最简表达式。

（3）由表达式列出真值表。

（4）根据真值表来确定电路的逻辑功能，用简练的语言说明其功能。

【例 15-1】组合逻辑电路如图 15-1 所示，分析该电路的逻辑功能。

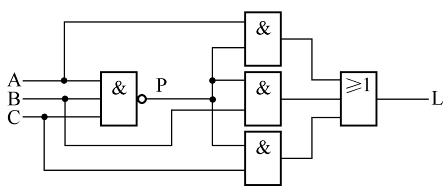


图 15-1　组合逻辑电路

【解】：（1）由逻辑图逐级写出逻辑表达式。为了写表达式方便，借助中间变量 P。

$$P=\overline{ABC}$$

$$L=AP+BP+CP$$

$$=A\,\overline{ABC}+B\,\overline{ABC}+C\,\overline{ABC}$$

（2）化简与变换：

$$L=\overline{ABC}\,(A+B+C)=\overline{\overline{ABC}+\overline{A+B+C}}=\overline{ABC+\overline{ABC}}$$

（3）由表达式列出真值表，如表 15-1 所示。因为经过化简与变换的表达式为两个最小项之和的非，所以很容易列出真值表。

表 15-1　真值表

A	B	C	L
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

（4）分析逻辑功能。由真值表可知，当 A、B、C 三个变量不一致时，电路输出为“1”，所以这个电路称为“不一致电路”。本例中输出变量只有一个，对于多输出变量的组合逻辑电路，分析方法完全相同。

15.2 编码器与译码器

15.2.1 编码器

所谓编码，就是用文字、符号或者数码按一定规律编排，编成不同的代码，使其表示某种特定含义的过程，称为编码。比如，电信局给每台电话机或手机编上号码的过程就是编码。在数字电路中只有 0 和 1 这两个数码，将若干个 0 和 1 按一定规律编排组成不同代码，并赋予这些代码特种意义，这就是某种二进制编码。

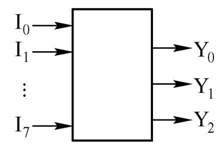


图 15-2　3 位二进制编码器示意图

1．二进制编码器

用 n 位二进制代码对 2^n 个信号进行编码的电路，就称为二进制编码器。

如图 15-2 所示是 3 位二进制编码器示意图。

I_0，I_1，…，I_7 是 8 个编码对象，分别代表十进制数 0，1，…，7 这 8 个数。编码的输出是 3 位二进制代码，用 Y_0，Y_1，Y_2 表示。

编码器每次只能对一个输入信号进行编码，即输入的 I_0，I_1，…，I_7 8 个变量中，要求其中任何一个为 1 时，其余 7 个均为 0，由此得出编码器的真值表，如表 15-2 所示。

表 15-2　二进制编码器真值表

十进制数	输入变量	Y_0	Y_1	Y_2
0	I_0	0	0	0
1	I_1	0	0	1
2	I_2	0	1	0
3	I_3	0	1	1
4	I_4	1	0	0
5	I_5	1	0	1
6	I_6	1	1	0
7	I_7	1	1	1

从真值表中可以得出：$Y_0=I_4+I_5+I_6+I_7$

$$Y_1=I_2+I_3+I_6+I_7$$

$$Y_2=I_1+I_3+I_5+I_7$$

上述表达式所对应的逻辑图如图 15-3 所示。

当 $I_4=1$，I_0，I_1，I_2，…，I_7 为 0 时，Y_0，Y_1，Y_2 编码输出为 100，其余类推即可。

2．二-十进制编码器

将十进制数 0，1，2，3，…，9 这 10 个数字编成二进制代码的电路，称为二-十进制编码器。

由于十进制数有 10 个数码，要对它们进行编码，则需要 4 位二进制代码，即 $2^4=16>10$，因此，二-十进制编码器的输出信号为 4 位，如图 15-4 所示。

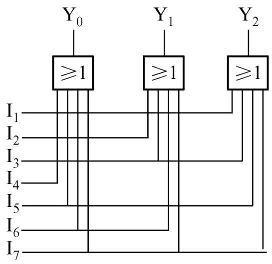


图 15-3　二进制编码器的逻辑图

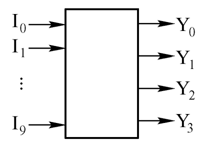


图 15-4　二-十进制编码器的示意图

下面介绍常用的二-十进制编码器是 8421BCD 编码器。8421 码是二进制代码的一种，它的"权"分别是 8，4，2，1。每组代码加权系数之和，就是它代表的十进制数。如代码 1010，即 8＋0＋2＋0＝10。

表 15-3 列出了 8421BCD 码的真值表。

表 15-3　8421BCD 码的真值表

十 进 制 数	输 入 变 量	8421 码			
		Y_0	Y_1	Y_2	Y_3
0	I_0	0	0	0	0
1	I_1	0	0	0	1
2	I_2	0	0	1	0
3	I_3	0	0	1	1
4	I_4	0	1	0	0
5	I_5	0	1	0	1
6	I_6	0	1	1	0
7	I_7	0	1	1	1
8	I_8	1	0	0	0
9	I_9	1	0	0	1

上述的编码器在工作时只允许一个输入端输入有效信号，否则编码器电路不能正常工作，会使输出发生错误。优先编码器则不一样，它允许几个信号同时加到编码器的输入端，但是由于各输入端的优先级别不同，编码器只接收级别最高的一个输入信号，而对其他的输入信号不接收。

15.2.2　译码器

能实现译码功能的逻辑电路称为译码器。可见，译码是编码的逆过程。

1．二进制译码器

将二进制代码的各种状态，按其原来含义"翻译"成对应的输出信号的电路，叫二进制译码器。

二进制译码器的示意图如图 15-5 所示。

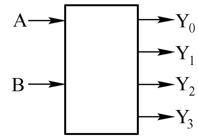


图 15-5　二进制译码器的示意图

二进制译码器的真值表如表 15-4 所示。

表 15-4 二进制编码器的真值表

A	B	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

由真值表可得：$Y_0=AB$，$Y_1=A\overline{B}$，$Y_2=\overline{A}B$，$Y_3=\overline{A}\ \overline{B}$。

图 15-6 为 2 位二进制译码器的逻辑图。

显然，图中若 AB 为 1，0 状态时，只有 Y_1 输出高电平，其余 3 个与门输出均为低电平。

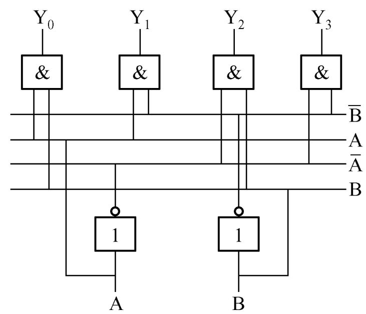


图 15-6 2 位二进制译码器的逻辑图

2．二-十进制译码器

将二进制代码翻译成 0～9 十个十进制数信号的电路，称为二-十进制译码器。

二-十进制译码器的示意图如图 15-7 所示。由图可知，一个二-十进制译码器有 4 个输入端、10 个输出端，通常也叫 4 线-10 线译码器。

图 15-8 为 8421BCD 码译码器的逻辑图，输出为低电平有效。

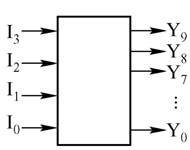


图 15-7 二-十进制译码器的示意图

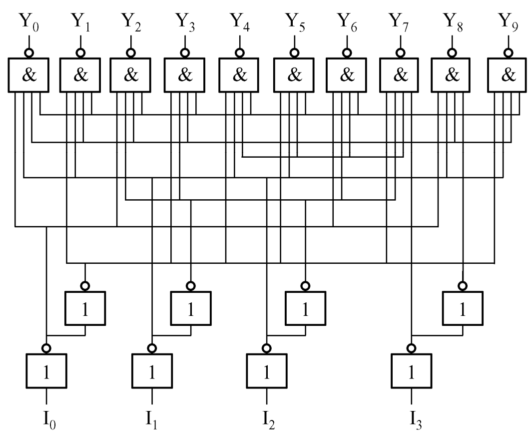


图 15-8 8421BCD 码译码器的逻辑图

由逻辑电路图可得：$Y_0=\overline{\overline{I}_0\overline{I}_1\overline{I}_2\overline{I}_3}$，$Y_1=\overline{I_0\overline{I}_1\overline{I}_2\overline{I}_3}$，$Y_2=\overline{\overline{I}_0 I_1\overline{I}_2\overline{I}_3}$

$Y_3=\overline{I_0 I_1\overline{I}_2\overline{I}_3}$，$Y_4=\overline{\overline{I}_0\overline{I}_1 I_2\overline{I}_3}$，$Y_5=\overline{I_0\overline{I}_1 I_2\overline{I}_3}$

$Y_6=\overline{\overline{I}_0 I_1 I_2\overline{I}_3}$，$Y_7=\overline{I_0 I_1 I_2\overline{I}_3}$，$Y_8=\overline{\overline{I}_0\overline{I}_1\overline{I}_2 I_3}$

$Y_9=\overline{I_0\overline{I}_1\overline{I}_2 I_3}$

Y_0～Y_9 就是译码器的输出逻辑表达式。当 $I_0I_1I_2I_3$ 分别表示 0000～1001 十个 8421BCD 码时，就能得到如表 15-5 所示的二进制译码器真值表。

表 15-5　二进制译码器真值表

I_3	I_2	I_1	I_0	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

例如，当 $I_0I_1I_2I_3=0001$ 时，$Y_1=0$，而 $Y_0=Y_2=Y_3=\cdots Y_9=1$，它表示 8421BCD 码译成十进制码为 1。

15.3 触发器

15.3.1 RS 触发器

基本 RS 触发器可由两个与非门交叉连接而成，如图 15-9 所示，图（a）为逻辑电路图，图（b）为逻辑符号。它有两个输入端 $\overline{S}_D$ 和 $\overline{R}_D$，两个互补的输出端 Q 和 $\overline{Q}$，两个输出端的状态在正常情况下总是相反的，通常把 $\overline{Q}$ 端的态作为触发器的工作状态。

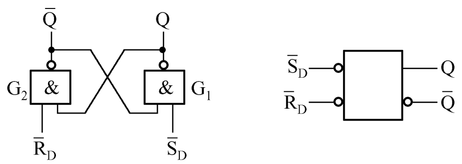
触发器在正常情况下具有两个稳定状态：一个是 $Q=1$，$\overline{Q}=0$ 状态，称为“ 1 ”态或“ 置位 ”状态；另一个是 $Q=0$，$\overline{Q}=1$ 状态，称为“ 0 ”态或“ 复位 ”状态。$\overline{S}_D$ 称为直接置位端或直接置“ 1 ”端，$\overline{R}_D$ 称为直接复位端或直接置“ 0 ”端。由于该触发器具有两种稳定状态，故称为双稳态触发器。下面来分析触发器的输入、输出关系，在分析中，用 Q^n 表示触发器原来的状态，用 Q^{n+1} 表示触发器接收输入信号触发后的新状态。

当 $\overline{S}_D=1$，$\overline{R}_D=1$ 时，若触发器的原状态为“ 1 ”态，即 $Q^n=1$，$\overline{Q}^n=0$。由于 G_2 门输出为“ 0 ”，反馈到 G_1 门输入端，必使 G_1 门输出 $\overline{Q}^n$ 继续为“ 1 ”，同时 G_1 门的输出又反馈到 G_2 门输入端，又确保了 G_2 门输出 $\overline{Q}^n$ 继续为“ 0 ”，即触发器保持原状态不变。若触发器的原状态为“ 0 ”态，即 $Q^n=0$，$\overline{Q}^n=1$，则同样可推导出触发器保持原状态不变。说明触发器此时具有记忆和保持信息的功能，即 $Q^{n+1}=Q^n$。

当 $S_D=0$，$\overline{R}_D=1$ 时，（$\overline{S}_D$ 端输入一负脉冲）无论 Q^n 为何状态，必有 $Q^{n+1}=1$、$\overline{Q}^{n+1}=1$、$Q^{n+1}=0$，由于 $\overline{Q}^{n+1}$ 又反馈到 G_1 门输入端，这时，即使 $\overline{S}_D=0$ 的信号消失，Q^{n+1} 仍为“ 1 ”态。故触发器置“ 1 ”。

当 $\overline{S}_D=1$，$\overline{R}_D=0$ 时，（$\overline{R}_D$ 端输入一负脉冲）无论 Q^n 为何状态，必有 $Q^{n+1}=0$、$\overline{Q}^{n+1}=1$，由于 Q^{n+1} 反馈到 G_2 门输入端，即使 $\overline{R}_D=0$ 的信号消失，同样可使 $Q^{n+1}=0$，$\overline{Q}^{n+1}=1$。故触发器置 0。

当$\overline{S}_D=0$，$\overline{R}_D=0$ 时，（$\overline{S}$、$\overline{R}_D$端同时输入负脉冲），在此期间，$Q^{n+1}=1$，$\overline{Q}^{n+1}=1$，这一状态破坏了双稳态触发器的正常逻辑关系，即违反了 Q 和$\overline{Q}$的互补原则。若输入状态再变成$\overline{S}_D=1$，$\overline{R}_D=1$（负脉冲同时消失），则 G_1 和 G_2 门的输入端均为“1”，使得 Q 和 Q^n 都为 0，似乎 Q 和 Q 将在“1”和“0”之间振荡。事实上，这种振荡不可能出现，因为 G_1 和 G_2 门的平均延迟时间 t_{pd1} 和 t_{pd2} 不可能完全相等，若 $t_{pd1}<t_{pd2}$，则触发器将稳定在 $Q^{n+1}=0$，$\overline{Q}^{n+1}=1$ 的状态，若 $t_{pd1}>t_{pd2}$，则触发器将稳定在 $Q^{n+1}=1$，$\overline{Q}^{n+1}=0$，由于 t_{pd1} 和 t_{pd2} 往往是随机的，故触发器的最终状态是不定的。这种输入状态在使用中应尽可能避免，即$\overline{S}_D=\overline{R}_D=0$ 为禁用输入状态。表 15-6 是基本 RS 触发器的真值表。



（a）逻辑电路图　　（b）逻辑符号

图 15-9　基本 RS 触发器

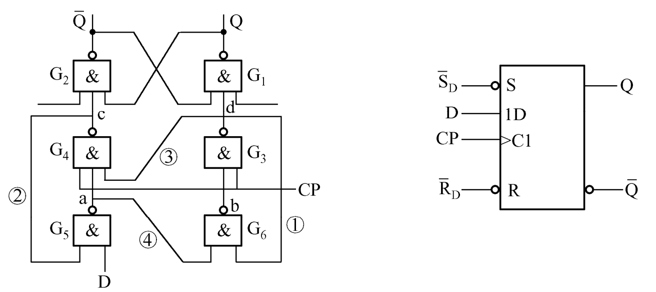
表 15-6　基本 RS 触发器的真值表

S	R	Q^{n+1}
0	0	0
0	1	1
1	0	Q^n
1	1	不定

15.3.2　D 触发器*

在这一节中，主要介绍 TTL 维持阻塞型 D 触发器。

如图 15-10（a）所示为维持阻塞型 D 触发器逻辑电路图，它由 6 个与非门组成。其中，G_1 和 G_2 两个门构成基本 RS 触发器，G_3，G_4，G_5 和 G_6 4 个门构成导引电路，输出端为互补的 Q 和$\overline{Q}$，时钟脉冲加在 G_3 和 G_4 门输入端，输入信号 D 加在 G_6 门输入端，①，②，③，④为 4 条维持阻塞反馈线。



（a）逻辑电路图　　（b）逻辑符号

图 15-10　维持阻塞型 D 触发器

下面讨论该触发器的工作原理。

在 CP=0 时，G_3 门和 G_4 门均被封锁，其输出 c 和 d 均为“1”，基本 RS 触发器保持原状态不变。G_5 门和 G_6 门的输出 a 和 b 状态由 D 端输入信号的状态而定，此时触发器处于等待状态。

当 CP 从“0”上跳到“1”，即时钟脉冲的前沿到达时，我们分两种情况来讨论。

若 D=0，G_6 门输出 a 为“1”，G_5 门 2 个输入端 a 和 d 均为“1”，其输出 b 为“0”，G_3 门被封锁，当 CP 前沿到达时，从 G_4 门进入，G_4 门输出 c 从“1”变为“0”，触发器处于清“0”

状态（Q＝0），同时通过置“ 0 ”维持线②封锁 G_6 门，以保证 a 为“ 1、c 为“ 0 ”，并通过置“ 1 ”阻塞线④，使 b 为“ 0 ”，阻塞了置“ 1 ”通道。此时，无论输入信号 D 发生什么变化，都不会再改变触发器输出状态了。

若 D＝1，由于 G_4 门输出 c 此时也为“ 1 ”，故 G_6 门输出 a 为“ 0 ”，封锁了 G_4 门和 G_5 门，G_5 门输出 b 也为“ 1 ”，当 CP 前沿到达时，由于 G_4 门封锁了，故 CP 从 G_3 门进入，G_3 门输出 d 从“ 1 ”变为“ 0 ”，触发器处于置“ 1 ”状态（Q＝1），同时通过置“ 0 ”阻塞线③封锁 G_4 门，阻塞了置“ 0 ”通道，并通过置“ 1 ”维持线①封锁 G_5 门，保证 G_5 门输出 b 为“ 1 ”。此时，无论输入信号 D 发生什么变化，由于 G_4 和 G_5 门均已封锁，触发器输出状态不会再改变了。

从上述分析可知，维持阻塞型 D 触发器在 CP＝0 时，输出保持不变；在 CP 从“ 0 ”上跳到“ 1 ”的脉冲前沿到达时，触发器接收这一时刻输入 D 的状态并改变输出状态，这一时刻后，输入信号无论怎样变化，触发器输出状态不再改变，必须等到下一种脉冲前沿到来时才会再发生变化，故该触发器是一种脉冲前沿触发翻转的边沿触发器，可有效地防止空翻现象和“ 一次翻转 ”现象。表 15-7 为 D 触发器的真值表。

维持阻塞型 D 触发器的逻辑符号如图 15-10（b）所示，图中 CP 输入端没有小圆圈，表示它是在 CP 前沿触发器翻转的触发器，如果是下降沿触发，则需在 CP 输入端加上小圆圈。若输入 D 有两个以上输入端（如 D_1、D_2、D_3）时，则输入之间是与逻辑关系，即 $D=D_1D_2D_3$。

表 15-7　D 触发器的真值表

D	Q^{n+1}
1	0
0	1

图 15-11 所示为 D 触发器当输入 D 端为某一信号时的工作波形。

中规模集成 TTL 维持阻塞型 D 触发器有 7424、74H74 等型号。图 15-12 为 7474 型双 D 集成触发器引脚排列图，它内部集成了两个独立的维持阻塞型 D 触发器，其输入、输出分别用 1D、2D、1Q、2Q 表示。

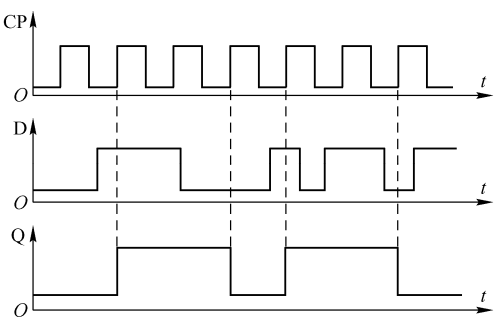


图 15-11　维持阻塞型 D 触发器工作波形

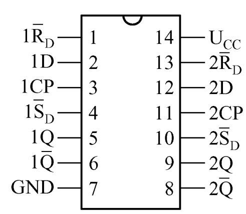
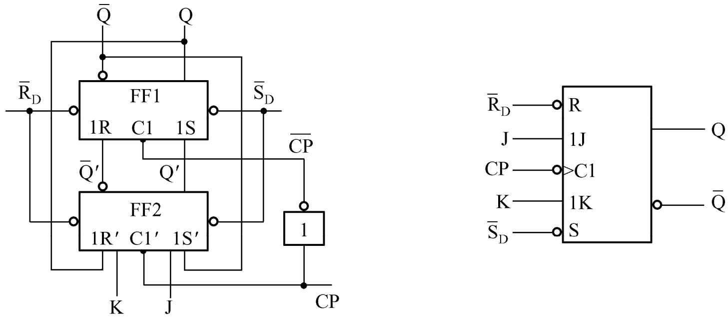


图 15-12　7474 型双 D 集成触发器引脚排列图

15.3.3　JK 触发器*

凡是在时钟信号作用下逻辑功能符合表 15-8 所规定的逻辑功能者，都称为 JK 触发器。本节以主从型 JK 触发器为例进行讲解。

图 15-13 为主从型 JK 触发器的逻辑电路和逻辑符号。从图 15-13（a）的逻辑电路可知，它是由两个同步 RS 触发器相连而成的，触发器 FF1 称为主触发器，触发器 FF2 称为从触发器，主触发器的输出为从触发器的输入，从触发器的输出 Q 和 $\overline{Q}$ 交叉反馈至主触发器的输入，主触发器增加了两个信号输入端 J 和 K，电路中的非门为隔离引导门，它使主触发器和从触发器分别得到相位相反的时钟脉冲信号，这样可将接收输入信号和改变输出状态从时间上分开。$\overline{S}_D$ 和 $\overline{R}_D$ 为设置初始状态用的直接触发端，触发器工作时应将其保持在高电平上。



（a）逻辑电路　　　　（b）逻辑符号

图 15-13　主从型 JK 触发器的逻辑电路和逻辑符号

下面讨论该触发器的工作原理。

当 J＝0，K＝0 时，无论 CP＝0 还是 CP＝1，主触发器输入控制门均被封锁，触发器保持原状态不变。

当 J＝1，K＝0 时，若触发器原状态为“0”态，在 CP＝1 时，主触发器由于两个 S 输入端（J 和 Q）均为“1”、两个 R 输入端（K 和 Q）均为“0”，故翻转为“1”态，此时，从触发器因时钟脉冲 CP＝0，状态不变，仍为“0”态。当 CP 从“1”下跳到“0”，CP＝0 时，主触发器被封锁，保持“1”态不变；而 CP＝1，从触发器跟随主触发器而翻转为“1”态。若触发器原状态为“0”态，在 CP＝1 时，主触发器由于两个 S 输入端中和两个 R 输入端中均有“0”信号（Q 和 K），故被封锁，主触发器保持原状态“1”不变，在 CP＝0 时，从触发器处于置“1”状态，故输出状态为“1”不变。因此，当 J＝1，K＝0 时，无论触发器初始状态如何，在 CP 下跳后，触发器将被置“1”（或保持“1”）。

当 J＝0，K＝1 时，同上述的分析方法一样，可知，无论触发器初始状态如何，在 CP 下跳后，触发器将被置“0”（或保持“0”）。

当 J＝1，K＝1 时，若触发器原状态为“0”（Q＝0，$\overline{Q}$＝1）。在 CP＝1 时，主触发器由于两个 S 输入端（J 和 Q）均为“1”，而两个 R 输入端中有“0”信号（Q＝0），故主触发器翻转为“1”态。CP＝0 后，主触发器封锁，“1”态不变，而从触发器将翻转为“1”态。若触发器原状态为“1”态（Q＝1，$\overline{Q}$＝0），在 CP＝1 时，主触发器由于 S 输入端中有“0”信号（Q＝0），而 R 输入端均为“1”，故主触发器翻转“0”态。CP＝0 后，主触发器封锁，“0”态不变，而从触发器将翻转为“0”态。

从上面分析可知，当 J＝1，K＝1 时，无论触发器初始状态如何，在 CP 脉冲作用后，触发器输出状态总是发生一次翻转。每来一个 CP 脉冲，触发器便翻转一次，即 $Q^n=1=Q^n$，触发器处于计数状态。

同步 RS 触发器构成的计数器相比较，JK 触发器在 CP＝1 时，主触发器开门接收信号、从触发器封锁、输出状态不变；在 CP＝0 时，主触发器封锁，从触发器开门改变输出状态。这种分两步走的工作方式决定了触发器在一个 CP 脉冲变化中只能最多翻转一次，故可避免。

因 CP 脉冲太宽而产生的“空翻”现象。

此外，J、K 端输入状态的任何组合都是允许的，没有禁用和不定的限制。由于主从型 JK 触发器的功能较全，同时可容易地转换为其他类型的触发器，故在数字时序逻辑电路中的应用非常广泛，是一种很实用的触发器。根据上述的分析，可写出主从型 JK 触发器的真值表，如表 15-8 所示。

表 15-8　主从型 JK 触发器真值表

S	R	Q^{n+1}
0	0	Q^n
0	1	0
1	0	1
1	1	Q^n

15.4 寄存器

在计算机和数字系统中，常常需要将一些数码暂时存放起来，能暂时存放数码的逻辑部件称为寄存器。

寄存器通常由具有记忆功能的触发器和某些起控制作用的门电路组成。一个触发器可以寄存 1 位二进制数，因此能存储 n 位二进制数的寄存器需要 n 个触发器。

寄存器接收数码的方式有双拍接收方式和单拍接收方式两种，前者是第 1 拍清零，第 2 拍存数；后者则是 1 拍就完成存数。

寄存器按功能可分为多种，但运用得较多的是数码寄存器和移位寄存器这两种，特别是不仅能寄存数码而且能使数码移位的移位寄存器使用广泛，是数字系数中进行算术运算必不可分的部件。

15.4.1 数码寄存器

如图 15-14 所示的逻辑电路是一个由 D 触发器组成的 4 位数码寄存器。它由 4 个 D 触发器组成，时钟脉冲端 CP 在这里作为存数指令端，D_0～D_4 为 4 位数码输入端，Q_0～Q_3 为 4 位数码的原码输出端，$\overline{Q}_0$～$\overline{Q}_3$ 为 4 位数码的反码输出端，$\overline{S}_D$ 为清零指令端。

当 4 位数码要存入时，先将数码送到相应的数据端，在存数指令到达后，则 $Q^{n+1}=D$ 数码便存入了寄存器，一直保存到下一次存数指令到达前。该电路的数码输出端未加控制电路，数码可直接取出。若加入输出控制门电路，则需要等到取数指令到达后，才能取数。这种将数码一并存入又一并取出的方式称为并入、并出方式。该电路存数前不需要专门清零，一步可完成存数过程，故属于单拍接收方式。

数码寄存器有专门的集成器件，TTL 中规模集成数码寄存器有 4 位的 74175，74LS175 等，另外还有 6 位、8 位等集成器件。

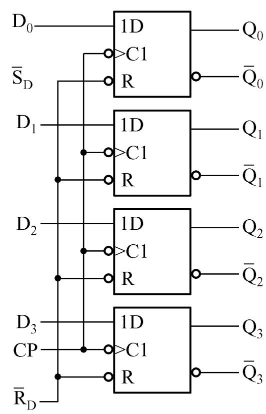


图 15-14　由 D 触发器组成的 4 位数码寄存器

15.4.2 移位寄存器

移位寄存器是在移位脉冲作用下，将寄存器中的数码依次向左移或向右移。按移动方式可分为单向（左移或右移）移位寄存器和双向移位寄存器，按数码输入输出方式可分为串行输入、并行输入、串行输出、并行输出等。

1．单向移位寄存器

1）串行输入—串并行输出右移寄存器

如图 15-15 所示为由 D 触发器构成的串行输入—串并行输出右移寄存器的逻辑电路。每个 D 触发器的输出端 Q 接到前一级 D 触发器的 D 输入端。最左边的 D 触发器 FF_3 的 D 端作为串行输入端，最右边的 D 触发器 FF_0 的输出端 Q_0 作为串行输出端。由于 D 触发器的输出状态 Q^{n+1} 只决定于 CP 脉冲到来之前瞬时的输入 D^n 的状态，所以，每来一个移位脉冲，上一触发器的输出状态就移入到下一触发器中，即数码向右移了 1 位。现举例说明。

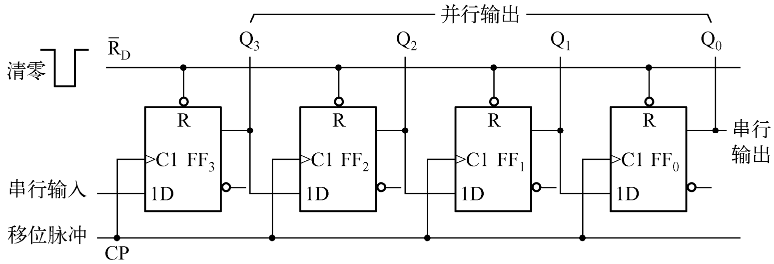


图 15-15　串行输入—串并行输出右移寄存器

在输入数码之前，首先清零。设需要寄存的 4 位数码是：1101，右移寄存器总是先从数码的最低位输入并向右移位。当第 1 个移位脉冲 CP 到来后，串行输入信号的最低位“1”移入 FF_3，此时 4 个触发器的输出状态 $Q_3Q_2Q_1Q_0$＝1000。当第 2 个 CP 脉冲到来后，串行输入信号的次低位“0”移入 FF_3。同时，FF_3 的“1”移入 FF_2，此时 $Q_3Q_2Q_1Q_0$＝0100；同样，依次分析可知，当第 3 个 CP 脉冲到来后，$Q_3Q_2Q_1Q_0$＝1010；当第 4 个脉冲到来后，$Q_3Q_2Q_1Q_0$＝1101，串行输入 4 位数码在 4 个 CP 移位脉冲的作用下，全部移入寄存器中。

若需输出这 4 位数码时，一种方法是并行输出，即通过 4 个触发器输出端 Q_3、Q_2、Q_1、Q_0 直接取出数码；另一种方法是串行输出，即继续输入 4 个 CP 移位脉冲，就可以在最低位触发器 FF_0 的输出端 Q_0 串行取出被寄存的数码。

上述数码移位过程如表 15-9 所示，其工作波形如图 15-16 所示。

表 15-9　4 位右移寄存器状态表

CP	D_3	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0
1	1	1	0	0	0
2	0	0	1	0	0
3	1	1	0	1	0
4	1	1	1	0	1
5	0	0	1	1	0
6	0	0	0	1	1
7	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0

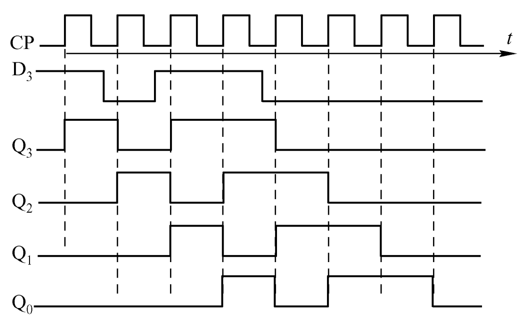


图 15-16　4 位右移寄存器工作波形

2）并串行输入—串行输出左移寄存器

如图 15-17 所示为由 4 个 D 触发器和 4 个与非门组成的 4 位并串行输入—串行输出左移寄存器的逻辑电路。每个 D 触发器的输出端接到下一个触发器的输入端。最右边的 D 触发器 FF_0

的输入 D 端作为串行输入端，最左边的 D 触发器 FF_3 的输出端 Q_3 作为串行输出端，4 个 D 触发器的直接置“1”端 $\overline{S}_D$ 通过 4 个与非门在存数指令脉冲控制下作为并行输入端。

左移寄存器的串行输入数码总是从高位到低位依次输入到 FF_0 的 D 端。与前面介绍的右移寄存器工作情况相似，在连续输入 4 个 CP 移位脉冲后，待寄存的 4 位数码逐个左移，存入寄存器中。

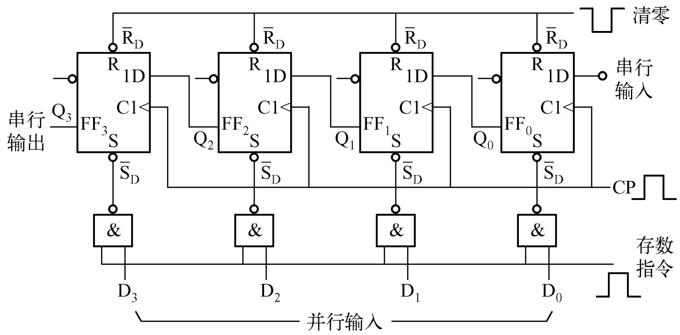


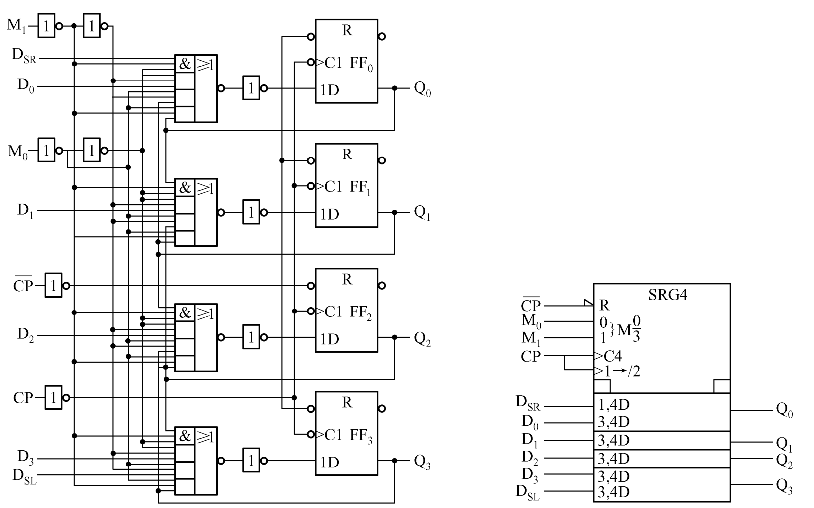
图 15-17　并串行输入—串行输出左移寄存器

该寄存器也可使用并行输入方式，输入数码时需采用双拍输入。第 1 步，在各位 D 触发器端加清零负脉冲，将各触发器清零。第 2 步，将 4 位待寄存数码加在 D_3、D_2、D_1、D_0 端，当存数指令脉冲到达后，便可将待寄存的 4 位数码直接存入寄存器中。

需要输出数码时，只要再输入 4 个 CP 移位脉冲，就可在最高位触发器 FF_3 的输出端 Q_3 处串行依次取出 4 位寄存的数码。

2．双向移位寄存器

上述移位寄存器都是单向移位，双向移位寄存器由于其功能更完善、更实用，而在实际中使用的更多。其中，较为典型的有中规模集成双向移位寄存器 74194（4 位）、74LS194（4 位）、74198（位）、74LS198（8 位）等。这里，以 74LS194 为例，介绍双向移位寄存器。图 15-18（a）为 74LS194 的逻辑电路，图 15-18（b）为逻辑符号。该电路由 4 个边沿 D 触发器 FF_0～FF_3 和 4 个与非门和相应的输入控制电路组成，图中，D_{SR} 为数码右移串行输入端，D_{SL} 为数码左移串行输入端，D_0～D_3 为数码并行输入端，M_1 和 M_0 为移位寄存器工作方式控制端，$\overline{CP}$ 为清零端，CP 为时钟脉冲端，Q_0～Q_3 为并行输出端。这是一个串行输入—串并行输出的双向移位寄存器。



（a）74LS194 逻辑电路图　　（b）74LS194 逻辑符号

图 15-18　集成双向移位寄存器 74LS194

该双向移位寄存器用 M_1 和 M_0 控制端的不同取值并通过 4 个相同的四选一数据选择器来选择和控制移位寄存器的工作方式。

若 M_1M_0＝00，在 CP 上升沿到达时，寄存器工作在“保持”状态。

若 M_1M_0＝01，在 CP 上升沿到达时，寄存器工作在“右移”状态，寄存数码可从 D_{SR} 端输入。

若 M_1M_0＝10，在 CP 上升沿到达时，寄存器工作在“左移”状态，寄存器可从 D_{SL} 端输入。

若 M_1M_0＝11，在 CP 上升沿到达时，寄存器工作在“数码并行输入”状态，待寄存的数码可从 D_0～D_3 端并行输入。

从上面可知，74LS194 具有左移、右移、并行输入、保持 4 种功能。表 15-10 为其逻辑功能表。表中的“×”处为任意状态、“↑”表示上升沿。

表 15-10　74LS194 双向移位寄存器逻辑功能表

功能	输入状态										输出			
	$\overline{CP}$	M_1	M_0	CP	D_{SR}	D_{SL}	D_0	D_1	D_2	D_3	Q_0^{n+1}	Q_1^{n+1}	Q_2^{n+1}	Q_3^{n+1}
清零	0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0	0	0
保持	1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	Q_0^n	Q_1^n	Q_2^n	Q_3^n
存数	1	1	1	↑	×	×	d_0	d_1	d_2	d_3	d_0	d_1	d_2	d_2
右移	1	0	1	↑	1	×	×	×	×	×	1	Q_0^n	Q_1^n	Q_2^n
	1	0	1	↑	0	×	×	×	×	×	0	Q_0^n	Q_1^n	Q_2^n
左移	1	1	0	↑	×	1	×	×	×	×	Q_1^n	Q_2^n	Q_3^n	1
	1	1	0	↑	×	0	×	×	×	×	Q_1^n	Q_2^n	Q_3^n	0
保持	1	0	0	↑	×	×	×	×	×	×	Q_0^n	Q_1^n	Q_2^n	Q_3^n

15.5　计数器

计数器是一种能累计输入脉冲数目的时序逻辑电路。除了计数，计数器还可用来定时、分频和进行数字运算等，几乎所有的数字系统中都有计数器。因此，计数器是数字系统中非常重要和基本的时序逻辑部件。

计数器的种类很多，按时钟脉冲作用方式可分为同步计数器和异步计数器；按进位制可分为二进制计数器、十进制计数器和任意进制计数器；按计数功能可分为加法计数器、减法计数器和可加可减的可逆计数器。此外，按集成工艺还可分为 TTL 型计数器和 NOS 型计数器等。

15.5.1　二进制计数器

1．二进制加法计数器

对于二进制数的加法，其规则是“逢 2 进 1”，即 0＋1＝1，1＋1＝10。当本位是 1，再加 1 时，本位便为 0，高位加 1，也就是说，每当本位从 1 变为 0 时，便向相邻高位进位，使高位加 1。1 位二进制数需要用一个触发器表示，n 位二进制数则需用 n 个触发器构成。

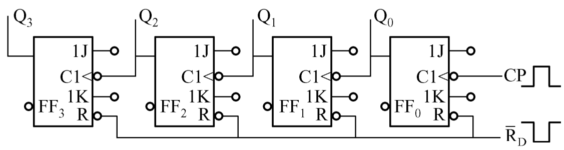
1）异步二进制加法计数器

所谓异步计数器，是指计数器脉冲不是同时加到各触发器的 CP 端，而是只加到最低触发器的 CP 端，其他触发器由相邻低位触发器输出的进位脉冲来触发。故各级触发器不是同时翻转的。

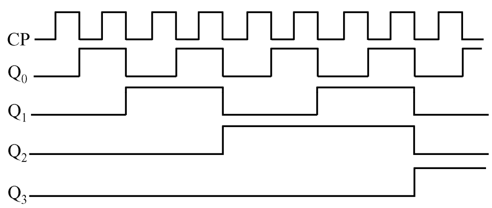
图 15-19（a）是由 JK 触发器构成的异步 4 位二进制加法计数器的逻辑电路，图 15-19（b）

为该计数器的工作波形图。JK 触发器的输入端 J 和 K 均接高电平，故触发器处于计数器状态，其 CP 端来一个脉冲后沿，输出便翻转一次。该计数器的最低位触发器 CP 端接计数脉冲，每一个触发器的输出端 Q 接到相邻高位触发器的 CP 端。这样，每输入一个计数脉冲，最低位触发器 FF_0 便翻转一次，当 FF_0 由"1"翻到"0"时，产生进位脉冲，使触发器 FF_1 翻转，同理，当 FF 由"1"翻转"0"时，FF_2 翻转；由"1"翻到"0"时，FF_3 翻转……从图 15-19（b）的工作波形图中可看到一过程。表 15-11 为该计数器的状态表。

4 位二进制计数器有 16 种组合状态，在第 16 个计数脉冲到来后，Q_3 端产生进位信号，整个计数器完成"逢 16 进 1"的功能，因此，也称 4 位二进制计数器为十六进制计数器或模十六计数器。对于符号 2^n（n=1，2，…）进制的计数器，也可称为 n 位二进制计数器。



（a）逻辑电路图



（b）工作波形图

图 15-19　异步 4 位二进制加法计数器

异步计数器的优点是电路结构简单，缺点是高位触发的翻转必须在低位触发器翻转之后进行，不是同时动作，所以进位时间较长，计数速度受到影响。

表 15-11　二进制加法计数器的状态表

CP	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	十进制数
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	2
3	0	0	1	1	3
4	0	1	0	0	4
5	0	1	0	1	5
6	0	1	1	0	6
7	0	1	1	1	7
8	1	0	0	0	8
9	1	0	0	1	9
10	1	0	1	0	10
11	1	0	1	1	11
12	1	1	0	0	12
13	1	1	0	1	13
14	1	1	1	0	14
15	1	1	1	1	15
16	0	0	0	0	0

2）同步二进制加法计数器

所谓同步计数器，是指计数器脉冲直接加到所有触发器的 CP 端，使各个触发器能够同时动作，大大减少了进位时间，计数速度较快。

同步计数器是通过控制各个触发器输入端的状态来决定各个触发器是否翻转。下面，仍然以由 4 个 JK 触发器构成的同步二进制加法计数器为例，讨论触发器输入端的接法，分析表 15-11 所示的二进制加法计数器状态表可以得出各个触发器输入端 J 和 K 的激励方程。

（1）触发器 FF_0，每来一个计数脉冲，就翻转一次，故 FF_0 的激励方程为：$J_0=K_0=1$。

（2）触发器 FF_1，在 $Q_0=1$ 时，再来一个脉冲才翻转；$Q_0=0$ 时，保持原状态。故 FF_1 的激励方程为：$J_1=K_1=Q_0$。

（3）触发器 FF_2，在 $Q_1=Q_0=1$，即 $Q_1Q_0=1$ 时，再来一个计数脉冲才翻转；而在 $Q_1Q_0=0$ 时，保持原状态。故 FF_2 的激励方程为：$J_2=K_2=Q_1Q_0$。

（4）触发器 FF_3，在 $Q_2=Q_1=Q_0=1$，即 $Q_2Q_1Q_0=1$ 时，再来一个计数脉冲才翻转；而 $Q_2Q_1Q_0=0$ 时，保持原状态。故 FF_3 的激励方程为 $J_3=K_3=Q_2Q_1Q_0$。

根据上述结果，可构成同步 4 位二进制加法计数器逻辑电路（如图 15-20 所示），由于采用多输入端的 JK 触发器，且每个触发器的多个 J 端（K 端）是与的逻辑关系，故不需要另外用与门。同步二进制加法计数器的工作波形与图 15-19（b）相同。

二进制加法计数器不仅能够进行二进制加法计数，还能够对计数脉冲进行分频。所谓分频，是把脉冲频率降低某个整数倍 N，脉冲频率降低了 N 倍称为 N 分频。从二进制加法计数器的工作波形图可以看出，每经过一级触发器，输出脉冲的周期增大 1 倍，即频率降低 1 倍，所以，n 位二进制加法计数器也就是 2^n 分频器。

4 位二进制加法计数器也称十六进制加法计数器，当输入第 16 个计数脉冲时，计数器状态将从“1111”翻转为初始状态“0000”，同时产生进位输出，若只有 4 个触发器，则计数器出现溢出。所以，4 位二进制加法计数器能保持的最大十进制数是 $2^4-1=15$”。n 位二进制加法计数器能保持的最大十进制数是 2^n-1。

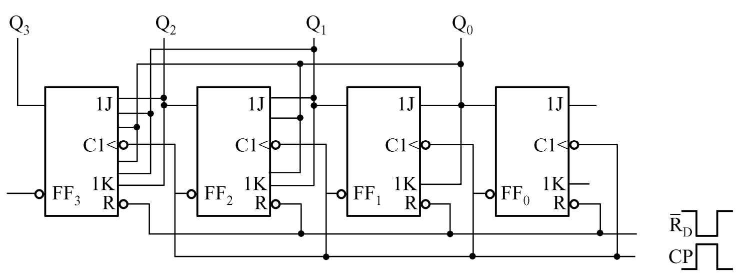


图 15-20　同步 4 位二进制加法计数器

2．二进制减法计数器

二进制减法计数器的功能是计数器的计数值随计数脉冲的增加而递减，若仍以 4 位二进制数为例，则二进制减法计数器的状态表如表 15-12 所示。二进制的减法运算与加法运算不同之处是，当 0 减 1 时，须向相邻高位借 1。对于计数器，则是本位触发器由“0”态翻成“1”态时，将向相邻高位触发器发出借位脉冲，并使其翻转。

表 15-12　二进制减法计数器状态表

CP	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	十进制数
0	1	1	1	1	15
1	1	1	1	0	14
2	1	1	0	1	13
3	1	1	0	0	12
4	1	0	1	1	11
5	1	0	1	0	10
6	1	0	0	1	9
7	1	0	0	0	8
8	0	1	1	1	7
9	0	1	1	0	6
10	0	1	0	1	5
11	0	1	0	0	4
12	0	0	1	1	3
13	0	0	1	0	2
14	0	0	0	1	1
15	0	0	0	0	0

图 15-21（a）是由 JK 触发器构成的 4 位同步二进制减法计数器的逻辑电路，图 15-21（b）为其工作波形图。

分析表 15-12 可得同步二进制减法计数器各触发器的激励方程分别为

$$J_0 = K_0 = 1；$$
$$J_1 = K_1 = \overline{Q_0}；$$
$$J_2 = K_2 = \overline{Q_1}\,\overline{Q_0}；$$
$$J_3 = K_3 = \overline{Q_2}\,\overline{Q_1}\,\overline{Q_0}。$$

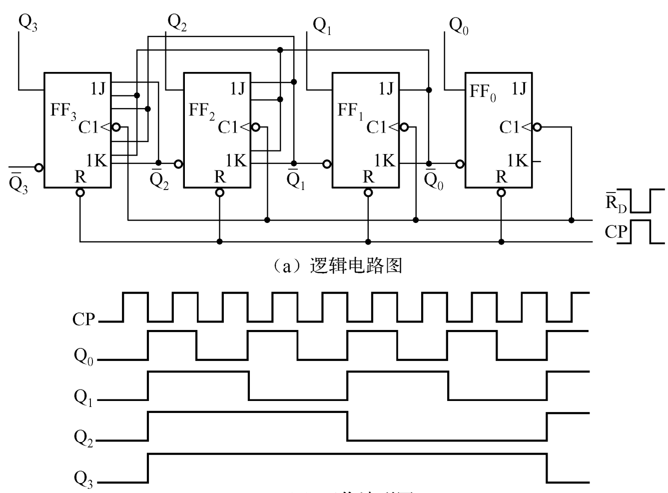


图 15-21　4 位同步二进制减法计数器

3．二进制可逆计数器

若将上述的同步二进制加法计数器与同步二进制减法计数器组合在一起，便构成了同步二

进制可逆计数器，如图 15-22 所示。当控制端 X=1 时，为加法电路；当 X=0 时，为减法电路。电路的具体工作原理不难理解，读者可自行分析。

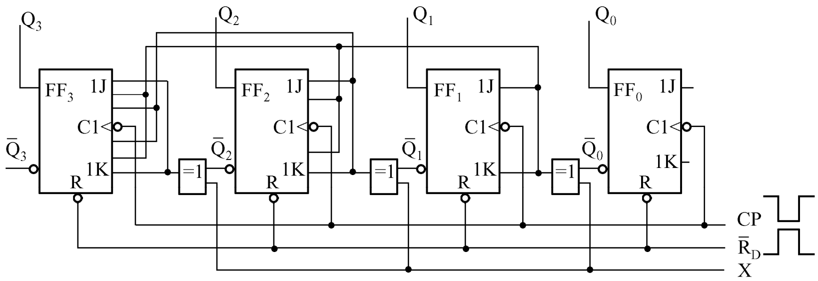


图 15-22　同步二进制可逆计数器

15.5.2　十进制计数器

在实际工作中，人们习惯于使用十进制数，而不是二进制数，所以在数字系统中常采用二、十进制计数器。

在 15.2.1 节中，已经介绍过使用广泛的 8421BCD 码。本节主要介绍这种 8421BCD 码的十进制加法计数器。

表 15-13 为 8421BCD 码十进制加法计数器的状态表。

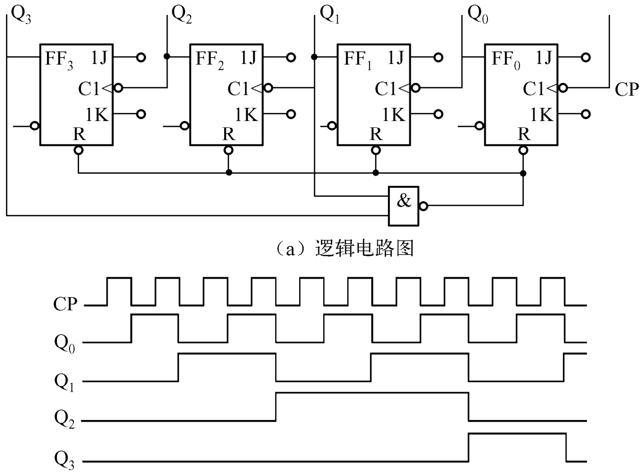
对 15.5.1 节中介绍的异步和同步二进制加法计数器电路稍做变动，便可分别得到异步和同步十进制加法计数器的逻辑电路图。

1．异步十进制加法计数器

由表 15-13 可以看出，当代表十进制数 10 的等效二进制数“1010”出现时，计数器的各触发器都应翻转为“0”，使计数器复位，即在 $Q_3Q_2Q_1Q_0$ 中，只要 Q_3 和 Q_1 同时为“1”时，便将各触发器复位为“0”。因此，将 Q_3 和 Q_1 同时引到一与非门的输入端，与非门的输出接到各触发器的复位端 $\overline{RD}$ 上，则有 $\overline{RD}=\overline{Q_3Q_1}$，当 $Q_3=Q_1=1$ 时，$\overline{RD}$ 为“0”，各触发器被强制清零复位。因此，当第 10 个脉冲到来后，计数器复位。如图 15-23（a）所示为由此法构成的异步 4 位十进制加法计数器的逻辑电路，图 15-23（b）为其工作波形图。

表 15-13　8421BCD 码十进制加法计数器的状态表

CP	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	十进制数
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	2
3	0	0	1	1	3
4	0	1	0	0	4
5	0	1	0	1	5
6	0	1	1	0	6
7	0	1	1	1	7
8	1	0	0	0	8
9	1	0	0	1	9
10	0	0	0	0	0



（a）逻辑电路图

（b）工作波形图

图 15-23　异步 4 位十进制加法计数器

2．同步十进制加法计数器

从 15.5.1 节分析同步二进制加法计数器可知：同步计数器是通过控制各触发器输入端的状态来决定各触发器的翻转。对于十进制加法计数器，要求在计数到第 9 个脉冲，即 4 个触发器的状态 $Q_3Q_2Q_1Q_0$＝1001 时，再来一个计数脉冲，这 4 个触发器应复位为“0000”，同时向高位发出进位信号。

根据表 15-13，运用观察法，可得出同步十进制加法计数器各 JK 触发器输入端 J 和 K 的激励方程：

（1）触发器 FF_0，每来一个计数脉冲就翻转一次，故激励方程为 $J_0=K_0=1$。

（2）触发器 FF_1，当在 $Q_0=1$，$Q_3=0$（$Q_3=1$）时，再来一个计数脉冲就翻转；而当在 $Q_0=1$，$Q_3=1$（$Q_3=0$）时，再来一个计数脉冲仍保持原状态“0”而不翻转，故激励方程为 $J_1=Q_3Q_0$，$K_1=Q_0$。

（3）触发器 FF_2，在 $Q_1=Q_0=1$ 时，再来一个计数脉冲就翻转，故激励方程为 $J_2=K_2=Q_1Q_0$。

（4）触发器 FF_3，当在 $Q_2=Q_1=Q_0=1$ 时，再来一个计数脉冲，则从“0”翻转为“1”，而当在第 9 个计数脉冲到来后，状态为“1001”，即 $Q_2=Q_1=0$，$Q_0=1$ 时，再来一个计数脉冲后，FF_3 应从“1”翻转为“0”。因此，第 9 个计数脉冲后，FF_3 的输入应处于复位的等待状态（$J_3=0$，$K_3=1$），故激励方程为 $J_3=Q_2Q_1Q_0$，$K_3=Q_0$。

根据上述各触发器输入端的激励方程，可构成由 4 个主从型 JK 触发器组成的 4 位同步十进制加法计数器，逻辑电路如图 15-24 所示，其工作波形与图 15-23（b）所示相同。

与二进制计数器一样，也可以构成十进制减法计数器、可逆计数器以及其他编码形式的十进制计数器，这里不再一一介绍，有兴趣的读者可参考有关书籍。

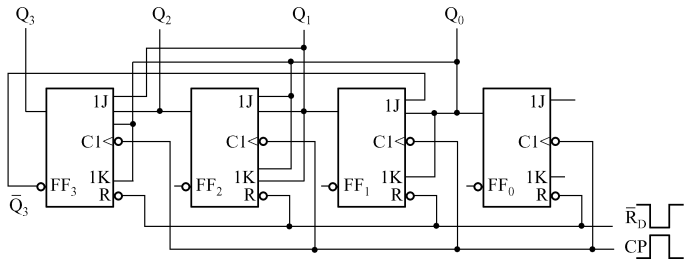


图 15-24　同步十进制加法计数器逻辑电路图

15.6　技能训练 19　触发器及其应用

15.6.1　技能训练目标

（1）熟悉集成 RS 触发器、D 触发器、JK 触发器的逻辑功能。

（2）了解集成触发器的简单应用。

（3）学习应用触发器设计计数器逻辑电路。

15.6.2　技能训练仪器与器件

（1）电子技术综合实验箱。

（2）数字万用表 DT9205。

（3）集成电路 74LS107、74LS74、74LS00 各一片。

15.6.3　技能训练内容与步骤

1．基本 RS 触发器逻辑功能的测试

如图 15-25 所示为 74LS00 外部引脚图，使用 74LS00，将其通入直流工作电流。

将高、低电平输入到用 74LS00 接成的 RS 触发器的输入端，测量输出端的电平变化，并将测试结果填入表 15-14 中。

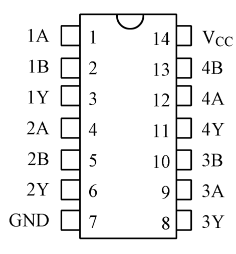


图 15-25　74LS00 外部引脚图

表 15-14　基本 RS 触发器逻辑功能表

A	B	Q	$\overline{Q}$
0	1		
1	0		
1	1		
0	0		

2．JK 触发器逻辑功能的测试

如图 15-26 所示为 74LS107 外部引脚图，使用 74LS107 双 JK 主从触发器（R_D 为清 0 端，$\overline{CP}$ 为时钟脉冲输入端），由电平输出给 JK 端不同的状态，由单脉冲或连续脉冲（低频）引入时钟脉冲信号，用电平显示观察 JK 触发器 Q 端的状态，测试其逻辑功能，将测试结果填入表 15-15 中。

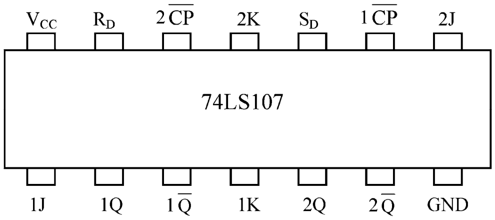


图 15-26　74LS107 外部引脚图

表 15-15　74LS107 触发器逻辑功能表

R_D	$\overline{CP}$	J	K	Q	$\overline{Q}$
0	×	×	×		
1	↑	0	0		
1	↑	0	1		
1	↑	1	0		
1	↑	1	1		

3．D 触发器逻辑功能的测试

如图 15-27 所示为 74LS74 外部引脚图，使用 74LS74（正边沿触发的双 D 触发器，R_D 为清 0 端，S_D 为置位端，$\overline{CP}$ 为时钟脉冲输入端），测试其逻辑功能。

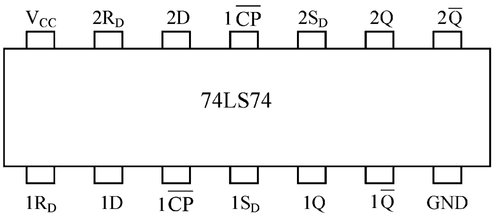


图 15-27　74LS74 外部引脚图

表 15-16　74LS74 D 触发器逻辑功能表

R_D	S_D	$\overline{CP}$	D	Q	$\overline{Q}$
1	0	×	×		
0	1	×	×		
1	1	↑	1		
1	1	↑	0		

1）R_D 和 S_D 端的作用

由单脉冲引入 R_D 和 S_D 信号，用电平显示观察 Q 端的状态。

2）D 触发器的逻辑功能

由电平输出给 D 端不同的状态，由单脉冲引入时钟脉冲信号，用电平显示观察 D 触发器 Q 端的状态，测试其逻辑功能，将测试结果填入表 15-16 中。

4．用 D 触发器搭建同步三分频器

如图 15-28 所示为同步三分频器电路，用以改变信号源的频率，分得所需频率的信号。

图 15-28 中采用了 74LS74 双上升沿 D 触发器集成电路。

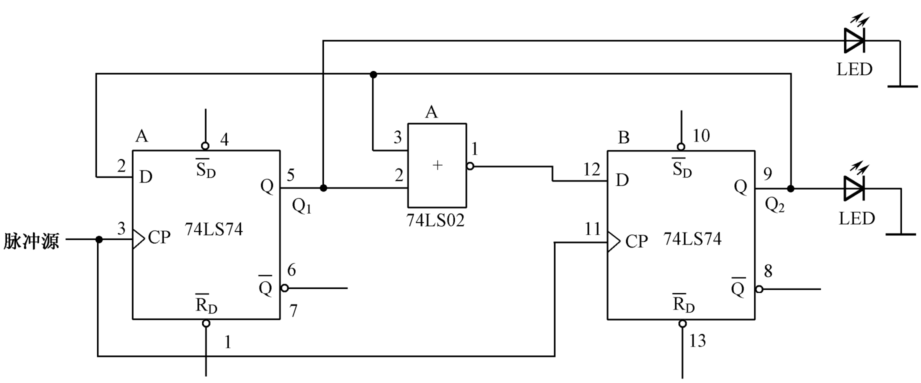


图 15-28　同步三分频器电路

（1）时钟脉冲为单次脉冲时，记录 Q_1、Q_2 的显示情况，判断结果是否正确。

（2）时钟脉冲为 1kHz 边沿脉冲信号时，用双踪示波器观察 Q_1、Q_2 的波形，并分别与 CP

端输入脉冲的波形相对应，画出 CP、Q_1、Q_2 的波形图，判断触发沿、计数状态是否正确。

15.6.4 注意事项

（1）不要忘记接集成电路芯片的电源线和地线。
（2）注意集成电路芯片的引脚排列。
（3）注意触发方式（单脉冲和序列脉冲）。

15.6.5 创新能力的启发和培养

怎样设计计数器逻辑电路？

提示：试用 74LS74 D 触发器组建二进制加法计数器。

15.6.6 思考问题

（1）同步三分频器电路是怎样进行分频的？
（2）单脉冲和序列脉冲触发分别能完成什么功能？
（3）使用集成电路的注意事项有哪些？

15.6.7 实训要求

（1）测量和记录实训内容中的数据和波形。
（2）回答思考问题。
（3）总结本次实训的认识、收获和建议。

思考题 15

1. 触发器有哪些种类？分别具有什么逻辑功能？
2. 如何用触发器组成寄存器和计数器？
3. 触发器的逻辑功能可以用哪些不同的形式来表示？
4. 寄存器可以分为哪两种？
5. 计数器又可分为哪两种类型？

教学微视频

扫一扫

第 16 章　数字电路的典型应用*

【本章学习目标】

1. 了解单稳态触发器、多谐振荡器以及 A/D 和 D/A 转换器;
2. 理解单稳态触发器脉冲整形电路的作用;
3. 理解多谐振荡器产生矩形脉冲的作用，学会在频率稳定性要求较高的场合，需采取稳频措施;
4. 了解 555 定时器是将模拟电路和数字电路集成在同一硅片上的时基电路，掌握其各种应用电路的组合;
5. 学会使用将模拟量转换为数字量或将数字量转换为模拟量的转换器，即 A/D 转换器和 D/A 转换器。

本章为课程选修内容，如需阅读详细内容请扫描以下二维码。

扫一扫

说明： 本章内容约有 13 页，如需该章内容的纸质文稿，请通过电子邮箱 puyue@phei.com.cn 联系我们，并请将书名、章节名，以及您个人的联系方式（姓名、地址、电话）发送到该邮箱，我们将为您提供有偿打印寄送服务，每份文稿资料将收取 8 元打印邮寄服务费。